

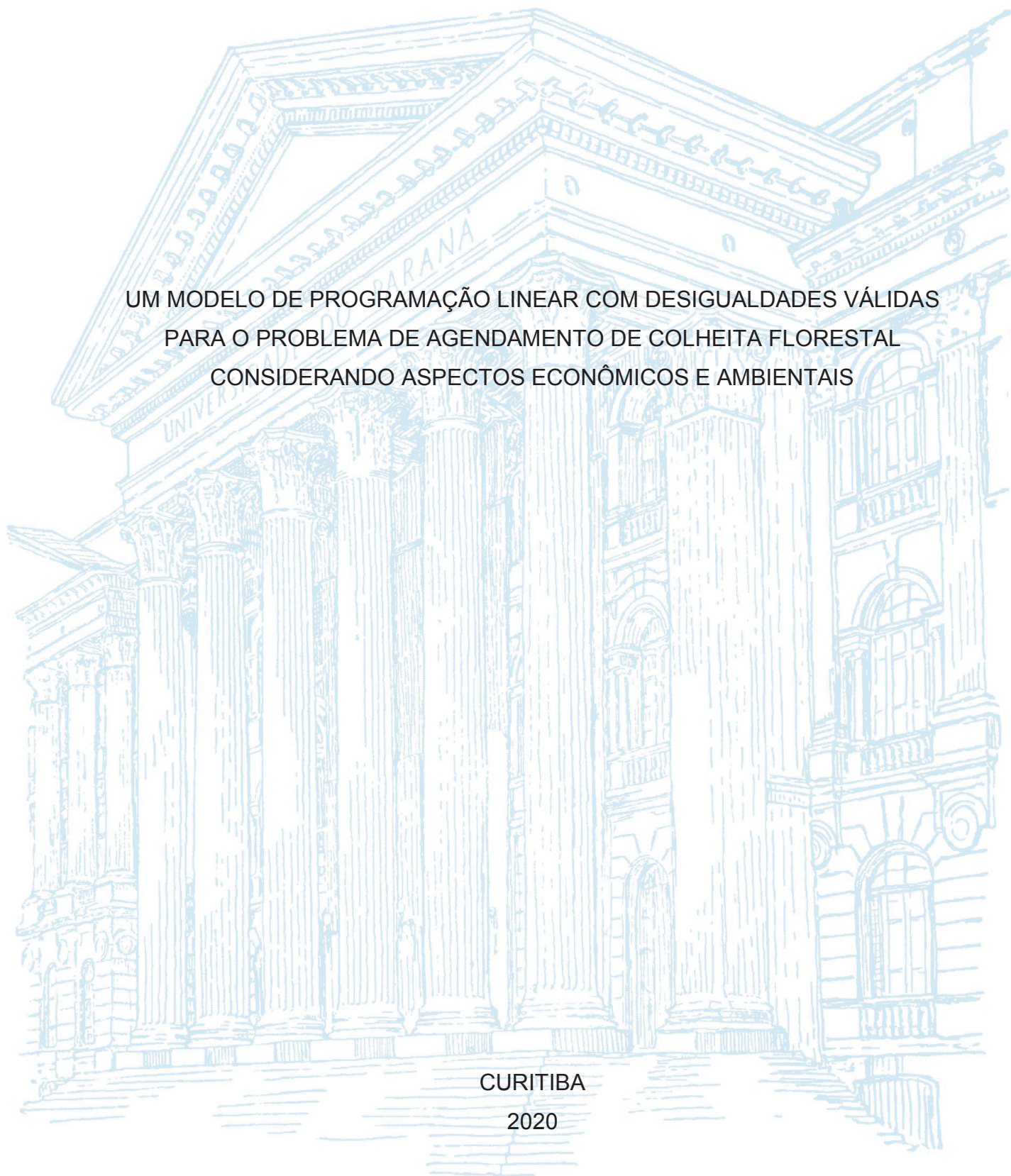
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENATA NAKO CORREA

UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COM DESIGUALDADES VÁLIDAS
PARA O PROBLEMA DE AGENDAMENTO DE COLHEITA FLORESTAL
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

CURITIBA

2020



RENATA NAKO CORREA

UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COM DESIGUALDADES VÁLIDAS
PARA O PROBLEMA DE AGENDAMENTO DE COLHEITA FLORESTAL
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre Métodos Numéricos em Engenharia, área de concentração em Programação Matemática, no curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C824m Correa, Renata Naoko

Um modelo de programação linear com desigualdades válidas para o problema de agendamento de colheita florestal considerando aspectos econômicos e ambientais [recurso eletrônico] / Renata Naoko Correa – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setores de Tecnologia e Ciências Exatas, Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

1. Programação Linear. 2. Planejamento Florestal - Colheita. I. Universidade Federal do Paraná. II. Scarpin, Cassius Tadeu. III. Título.

CDD: 519.77



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MÉTODOS NUMÉRICOS
EM ENGENHARIA - 40001016030P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MÉTODOS NUMÉRICOS EM ENGENHARIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **RENATA NAKO CORREA** intitulada: **UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COM DESIGUALDADES VÁLIDAS PARA O PROBLEMA DE AGENDAMENTO DE COLHEITA FLORESTAL CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**, sob orientação do Prof. Dr. CASSIUS TADEU SCARPIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Março de 2020.



CASSIUS TADEU SCARPIN

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



LEONARDO SILVA DE LIMA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



JULIO EDUARDO ARCE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



LUCAS REZENDE GOMIDE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de desenvolver este trabalho e toda a trajetória do mestrado. A minha mãe e irmã que me deram apoio e estiveram comigo nos momentos difíceis. A meu pai que sempre me incentivou e apoiou minhas decisões. A meu avô, que de onde ele estiver, veja meu reconhecimento pelos dias em que me acordava para ir à escola, este é mais um fruto de toda a sua dedicação comigo. A minha avó que sempre me incentivou e torceu pelas minhas conquistas. A minha família.

A meu orientador e professor Cassius Tadeu Scarpin, pelos ensinamentos na área de Pesquisa Operacional, incentivos a escrever artigos para publicação, pela atenção e paciência.

A meus amigos de vida, Amanda e Matheus, por sempre me darem atenção e apoio, independente dos meus objetivos. A minha amiga Linamara por ter apresentado a área florestal, tendo paciência para sanar todas as minhas dúvidas. A meus amigos, colegas e professores do GTAO que sempre estiveram receptivos a tirar dúvidas e colaborar no meu conhecimento, em especial, agradecer ao Vinicius e ao Cleder pelos ensinamentos no uso do Gurobi. A amigos que conquistei dentro do PPGMNE. Aos professores do PPGMNE que contribuíram na minha aprendizagem.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Seiryoku-Zen-Yo (máxima eficiência com mínimo esforço)

Jigoro Kano

RESUMO

O Brasil é uma potência no setor florestal, uma vez que possui climas e solos propícios para o desenvolvimento das árvores. Por isso, é fundamental na área florestal o planejamento adequado das ações em nível estratégico, tático e operacional. Considerando o nível tático, a colheita é uma das operações que possui um elevado nível de custo, pois contabiliza os custos operacionais e logísticos a serem realizados. Devido a isso, o problema de agendamento de colheita florestal é importante e se torna complexo uma vez que leva em conta a espacialização das operações em extensas áreas. Devido a esta característica, pode existir conflitos entre produção e aspectos ambientais. Desta forma, foi elaborado um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), atendendo as restrições conhecidas na literatura, como: controle de volume, área máxima e a designação para corte do talhão em apenas um único período do Horizonte de Planejamento (HP). Além disso, o modelo possui restrições de área mínima, agregação de talhões, formação de blocos e aproximação de talhões selecionados em períodos consecutivos, contribuindo, desta forma, com uma abordagem mais completa em relação ao que se conhece da literatura correlata. Também se considerou a restrição de idade mínima para corte e imposição de talhões para corte no primeiro período do HP. O diferencial deste modelo é que estas situações, na literatura, não foram trabalhadas todas juntas em um único modelo, o que, de fato, é apresentado no decorrer deste trabalho. Além disso, é possível controlar a quantidade máxima permitida de abertura de blocos, sendo algo não observado, no melhor de nosso conhecimento, na literatura. Para os testes, foi desenvolvido um gerador de cenários, ou seja, um gerador de florestas. Esta necessidade decorre do fato que não existe uma vasta coleção de instâncias disponíveis na literatura e muitos trabalhos são abordados com estudos de casos nos quais se tem acesso aos dados florestais. Por fim, foi implementado um conjunto de Desigualdades Válidas (DV) para a análise relacionada ao desempenho computacional e velocidade de convergência da solução otimizada. Ao analisar os resultados obtidos, especialmente, é possível verificar a agregação e o respeito da área máxima permitida, de forma a abrir mais de um bloco no mesmo período do HP. Assim, o regulamento ambiental, quanto a restrição de área máxima, é respeitado, de forma indireta, minimizando os custos operacionais da colheita. Além disso, observou-se que ao utilizar as restrições de idade mínima para o corte, a convergência é mais rápida. Foi verificado que as DV agregadas ao modelo PLIM proposto, seja de forma individual ou na combinação 2 a 2, se mostraram mais promissoras, garantindo boas soluções quanto a qualidade de resposta, bem como, diminuindo o tempo computacional necessário para essa obtenção.

Palavras-chave: Planejamento Tático de Colheita Florestal. Agregação de talhões. Restrição de área Florestal. Area Restriction Model. Modelo de Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

Brazil is a power in the forestry sector, since it has favorable climates and soils for the development of trees. For this reason, it is essential in the forestry area to adequately plan actions at a strategic, tactical and operational level. Considering the tactical level, the harvest is one of the operations that has a high level of cost, since it accounts for the operational and logistical costs to be carried out. Because of this, the problem of scheduling forest harvesting is important and becomes complex since it takes into account the spatialization of operations in large areas. Due to this characteristic, there may be conflicts between production and environmental aspects. Thus, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model was developed, meeting the constraints known in the literature, such as: volume control, maximum area and the designation for cutting the plot in just a single period of the Planning Horizon (PH). Also, the model has restrictions of minimum area, aggregation of blocks, formation of blocks and approximation of selected blocks in consecutive periods, thus contributing to a more complete approach in relation to what is known in the related literature. The minimum age constraint for cutting and the imposition of stands for cutting in the first period of PH were also considered. The differential of this model is that these situations, in the literature, were not all worked together in a single model. Also, in fact, is presented in the course of this work. In addition, it is possible to control the maximum allowed number of opening blocks, something that is not observed, to the best of our knowledge, in the literature. For the tests, a scenario generator was developed, that is, a forest generator. This need arises from the fact that there is not a vast collection of instances available in the literature and many works are addressed with case studies in which forest data are accessed. Finally, a set of Valid Inequalities (VI) was implemented for the analysis related to the computational performance and convergence speed of the optimized solution. When analyzing the results obtained, spatially, it is possible to verify the aggregation and the respect of the maximum allowed area, in order to open more than one block in the same period of PH. Thus, the environmental regulation, regarding the maximum area restriction, is respected, indirectly, minimizing the operational costs of the harvest. In addition, it was observed that when using the minimum age constraints for cutting, convergence is faster. It was verified that individually or in a combination of 2 to 2, were more promising, guaranteeing good solutions in terms of response quality, as well as, reducing the computational time necessary for this obtainment.

Keywords: Forest Harvest Tactical Planning. Stand aggregation. Forest area constraint. Area Restriction Model. Mixed Integer Linear Programming Model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- REPRESENTAÇÃO DA FLORESTA SUBDIVIDIDA EM TALHÕES	21
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE 3 BLOCOS DENTRO DA FLORESTA	22
FIGURA 3 - REPRESENTA A ABORDAGEM URM EM UM PERÍODO DO HP	25
FIGURA 4 - UM EXEMPLO DA ABORDAGEM ARM.....	25
FIGURA 5 - SORTIMENTOS DE UM TRONCO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DAS TORAS.....	45
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE CRIAÇÃO DE CENÁRIOS	46
FIGURA 7 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS PEQUENOS REFERENTE AO TEMPO DE SOLUÇÃO	52
FIGURA 8 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO REFERENTE AO VPL DA SOLUÇÃO	55
FIGURA 9 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO REFERENTE A GAP DE CADA SOLUÇÃO	56
FIGURA 10 - ESPACIALIZAÇÃO DO CENÁRIO 39 EM TODOS OS MODELOS APÓS 2H DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL.....	58
FIGURA 11 - ESPACIALIZAÇÃO DOS CENÁRIOS 34, 36 E 38	61
FIGURA 12 - BOXPLOT DOS VPL DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA	63
FIGURA 13 - BOXPLOT DOS GAP DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA	63
FIGURA 14 - BOXPLOT DOS VPL DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IMPOSIÇÃO DE TALHÕES PARA O CORTE NO PRIMEIRO ANO DO HP.....	67
FIGURA 15 - BOXPLOT DOS GAP DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IMPOSIÇÃO DE CORTE PARA O PRIMEIRO ANO DO HP	67
FIGURA 16 - ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO PARA O CENÁRIO PHYLLISLEPPER.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES USADAS E DESCRIÇÃO DAS MESMAS.....	36
TABELA 2 - NOMES DOS MODELOS UTILIZADOS EM CADA CENÁRIO E AS RESPECTIVAS RESTRIÇÕES	48
TABELA 3 - CENÁRIOS PROPOSTOS COM SUAS CARACTERÍSTICAS.....	49
TABELA 4 - NÚMERO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES DOS MODELOS ORIGINAL_ID E ORIGINAL_R CONSIDERANDO DETERMINADOS CENÁRIOS	51
TABELA 5 - RESULTADOS DO CENÁRIO 17 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS	57
TABELA 6 - RESULTADOS DO CENÁRIO 39 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS	57
TABELA 7 - VPL E GAP DOS CENÁRIOS 34, 36 E 38.	60
TABELA 8 - RESULTADOS DO CENÁRIO 44 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA PARA CORTE	64
TABELA 9 - ÁREA DE CORTE POR ANO DO HP DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DO CENÁRIO 44	65
TABELA 10 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ENTRE O MODELO ORIGINAL E ORIGINAL_ID EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO	65
TABELA 11 - RESULTADOS DO CENÁRIO 46 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO (4.15).....	68
TABELA 12 - RESULTADOS DO CENÁRIO 49 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO (4.15).....	69
TABELA 13 - RESULTADOS PARA O CENÁRIO KITTANING4 APRESENTANDO O TEMPO E O PERCENTUAL DE REDUÇÃO	70
TABELA 14 - RESULTADOS PARA O CENÁRIO PHYLLISLEEPER APRESENTANDO O TEMPO E O PERCENTUAL DE REDUÇÃO ...	71

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ARM	- Area Restriction Model
DV	- Desigualdade(s) Válida(s)
FSC	- Forest Stewardship Council
ha	- hectare
HP	- Horizonte de Planejamento
PIB	- Produto Interno Bruto
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
PO	- Pesquisa Operacional
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
URM	- Unit Restriction Model
VPL	- Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	18
1.3 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
2.1 CONCEITOS PRELIMINARES DE PLANEJAMENTO FLORESTAL	20
2.2 PLANEJAMENTO ESPACIAL DE AGENDAMENTO DE COLHEITA FLORESTAL	
23	
2.2.1 <i>Area Restriction Model</i> (ARM)	24
2.3 PROBLEMA ABORDADO	26
3 REVISÃO DE LITERATURA	28
3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	28
3.1.1 Trabalhos Correlatos	28
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.2.1 Desigualdade Válida no problema de alocação	33
3.3 MODELO PLIM PROPOSTO	34
4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	36
4.1 DESIGUALDADES VÁLIDAS	41
5 TESTES COMPUTACIONAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 CRIAÇÃO DE CENÁRIOS	44
5.1.1 Cenários pequenos	51
5.1.2 Cenários com tempo de processamento de nível tático	53
5.1.3 Considerando restrição de idade mínima	61
5.1.4 Considerando a imposição de talhões para corte no primeiro ano do HP	66
5.2 CENÁRIOS DA LITERATURA	69
5.3 DISCUSSÃO FINAL	75
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS.....	80

APÊNDICE 1 – TABELA COM CENÁRIOS PEQUENOS E RESULTADOS DOS MODELOS	85
APÊNDICE 2 – TABELA COM QUANTIDADE DE TEMPOS INFERIORES DE CADA DV COM A MÉDIA PERCENTUAL DE TEMPO DOS CENÁRIOS PEQUENOS	88
APÊNDICE 3 – TABELA COM RESULTADOS DOS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO	89
APÊNDICE 4 – TABELA COM QUANTIDADES EM QUE CADA COMBINAÇÃO DE DV É MELHOR QUE O MODELO ORIGINAL E A MÉDIA PERCENTUAL DE REDUÇÃO DOS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO	101
APÊNDICE 5 – TABELA COM CENÁRIOS E RESULTADOS OBTIDOS COM A RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA PARA CORTE	102
APÊNDICE 6 – TABELA DE QUANTIDADE DE GAP INFERIORES DE CADA DV COM A MÉDIA PERCENTUAL DE GAP CONSIDERANDO RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA	104
APÊNDICE 7 – TABELA COM CENÁRIOS E RESULTADOS DOS MODELOS COM RESTRIÇÕES DE IMPOSIÇÃO DE TALHÕES PARA O CORTE NO PRIMEIRO ANO DO HP	105
APÊNDICE 8 – TABELA COM QUANTIDADE DE GAP INFERIORES DE CADA DV COM A MÉDIA PERCENTUAL DE GAP EM RELAÇÃO AO MODELO ORIGINAL_R	107

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui a segunda maior cobertura florestal do mundo, porém é o único país detentor de extensa área de florestas tropicais (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2019). As características edafoclimáticas (solo e clima), assim como o desenvolvimento tecnológico do manejo florestal torna o país uma potência no setor florestal (MOREIRA; OLIVEIRA, 2017). Segundo Serviço Florestal Brasileiro (2019), o Ministério do Meio Ambiente avalia que 69% das florestas do país tem potencial produtivo, que o setor florestal é responsável por 3,5% do Produto Interno Bruto (PIB) e gera aproximadamente 7 milhões de empregos.

Assim como qualquer atividade de potência econômica, no setor florestal é necessário um planejamento organizado e eficiente. E por conta do processo de plantio, crescimento, colheita e logística florestal, é necessário levar em conta o tempo requisitado, de forma que o planejamento deve ser mais assertivo o possível ao longo do Horizonte de Planejamento (HP). Além disso, questões ambientais e sociais devem ser levadas em consideração, bem como as metas específicas da empresa florestal (RÖNNQVIST et al., 2015).

O planejamento atende problemas de uso do solo, construção e manutenção de estradas, colheita, transporte, produção de diversos sortimentos, distribuição para as fábricas de produtos madeireiras, entre outros. Segundo Machado e Lopes (2000), cerca de 50% dos custos do manejo de madeira refere-se aos custos de colheita e transporte. Por conta disso, o presente trabalho trata do problema de agendamento de colheita florestal de nível tático, tentando atender aspectos econômicos e ambientais.

Tratar destes tópicos em conjunto se torna desafiador, uma vez que são conflitantes (BASKENT; KELES, 2005; ÖHMAN; ERIKSSON, 2010). Considerando uma visão econômica, considera-se mais viável o corte de uma vasta extensão de área para a colheita, tendo um custo enxuto quanto ao deslocamento de pessoal e maquinários. Enquanto numa visão ambiental, visa-se selecionar um conjunto menor de área para a colheita num dado período, possibilitando a menor desfragmentação do solo e refúgio da fauna local.

Para isso foi desenvolvido um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para decidir quais talhões seriam colhidos num determinado período do HP, que possui restrições já apresentadas na literatura, como a restrição

do controle de volume. Porém contém restrições que em conjunto tentam lidar com estes aspectos conflitantes. Além disso, lida com a parte da espacialização da floresta, de modo a considerar as adjacências dos talhões, logo a complexidade do modelo PLIM a ser resolvido é NP-Hard (MARTINS; CONSTANTINO; BORGES, 2005) e por conta disso, foram aplicados 4 Desigualdades Válidas (DV) para analisar o desempenho computacional.

Algumas restrições impostas no modelo de PLIM que não são encontradas em conjunto na literatura, torna o modelo viável para aplicação em um caso real, como é o caso de controle de volume para mais de um tipo de sortimentos, restrição de idade mínima para o corte e imposição de uma região para o primeiro período de corte. Todas as situações serão melhor descritas na seção 6.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo geral

Propor um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista, utilizando desigualdades válidas, para o problema de agendamento de colheita florestal de nível tático considerando restrições operacionais que visam atender aspectos econômicos e ambientais concomitantemente. Aplicar o modelo em cenários desenvolvidos que considera o cultivo da espécie Pinus e seu desenvolvimento em terras brasileiras, levando em consideração dois tipos de sortimentos, serraria e celulose. Além disso, aplicar o modelo em cenários encontrados na literatura.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar uma formulação matemática considerando aspectos econômicos e ambientais na tomada de decisão da colheita florestal.
- Expor restrições que atendem mais de um sortimento, além de restrições de idade mínima para colheita e imposição de região para o corte no primeiro período do HP.
- Apresentar Desigualdades Válidas (DV) que foram desenvolvidas a partir da observação da relação entre as variáveis do modelo e/ou

retiradas na literatura, nos problemas de alocação ou de localidades de instalação.

- Testar as DV em cenários propostos e adaptados da literatura para comparação do desempenho computacional, individual e combinadas.
- Desenvolver um gerador de cenários para poder realizar os testes em grande escala.
- Analisar os resultados dos testes obtidos, comparando o modelo original e suas variações com os modelos utilizando as DV.

1.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O modelo desenvolvido, por lidar com restrições conflitantes, se adequa a realidade. Porém existe uma limitação para a aplicação prática e real desta proposta que é a obtenção de dados reais para validar o modelo, uma vez que a maioria das florestas brasileiras são comerciais e particulares. As empresas deste setor priorizam a confidencialidade dos dados e por conta disso, é muito difícil o contato com a empresa para fins de pesquisa, e mesmo que a receptividade seja boa, não é possível compartilhar os dados com outros pesquisadores e publicar em trabalhos acadêmicos.

Também, por conta do desenvolvimento do gerador de cenários, desenvolvimento do modelo PLIM e trabalhar com DV, não foi possível explorar metodologias heurísticas, meta-heurísticas ou matheurísticas (modelos híbridos). Na seção 6 é descrito algumas possibilidades de futuros trabalhos considerando o caso de estudo com uma floresta real.

1.3 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÕES

O modelo PLIM desenvolvido apresenta restrições novas de forma a trabalhar a agregação de talhões, sem ser necessário a criação de cluster a priori. Além disso, considerando a restrição de área máxima, para cada bloco formado, possibilita a abertura de mais de um bloco por período do HP. Sendo possível controlar a quantidade de abertura de blocos no mesmo período.

A agregação de talhões para o agendamento de colheita florestal que se torna um aspecto econômico, é pouco visto na literatura quando tratada junto com a restrição de área máxima, isto porque essa última restrição tem aspecto ambiental,

sendo situações conflitantes, primeiro se espera agregar o máximo possível de talhões minimizando por exemplo, custos de deslocamento de maquinários e pessoal e no segundo se espera atender a restrição de área máxima para se evitar a vasta área desmatada, causando diminuição de fauna ou erosão do solo.

Além disso, o modelo PLIM apresentado trabalha com restrição de idade mínima que na prática é muito usual, não cortando árvores muito novas porque não gera lucro e não apresentam características comerciais. Por fim, o trabalho com imposições de talhões adjacentes para o corte no primeiro período do HP, que na prática é comum, uma vez que entre as rotações, o(s) módulo(s) de corte pode(m) estar parado(s) em uma localização e se impõe o agendamento de talhões próximos a esta para o corte no primeiro período, a fim de ter um deslocamento menor dos maquinários e pessoal.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A apresentação deste estudo está organizada da seguinte forma. O capítulo 2 é dedicado apenas para as definições e conceitos dentro do planejamento florestal, até chegar ao detalhamento do problema de agendamento de colheita florestal.

O capítulo 3 apresenta detalhes sobre os trabalhos correlatos que envolvam agendamento de colheita florestal com a imposição de área mínima e agregação de talhões, além das definições dos recursos matemáticos da Pesquisa Operacional utilizados ao longo da pesquisa e uma DV retirado da literatura para usar como adaptação para este modelo.

O capítulo 4 descreve o modelo proposto, assim como as DV específicas para este modelo. Já o capítulo 5 apresenta todo o processo para a criação de cenários, a descrição de dois cenários encontrados na literatura e os resultados computacionais quando aplicado o modelo proposto, assim como o modelo com as DV, de forma individual ou combinação entre elas. Também é analisado a solução espacial dos resultados obtidos.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais de acordo com o processo da pesquisa e dos resultados obtidos, além de perspectivas quanto a trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo serão expostos alguns conceitos preliminares de planejamento e colheita florestal que ajudarão no entendimento do problema descrito, assim como dos capítulos seguintes.

2.1 CONCEITOS PRELIMINARES DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

Um empreendimento florestal necessita de um planejamento preciso de todas as ações que serão realizadas para que se torne sustentável em termos ambiental, econômico e social. Se pode resumir que planejamento implica no ato ou efeito de prever ou antecipar algo que ainda não aconteceu, segundo a literatura (FIORENTIN, 2016). No contexto do setor florestal, considerando a competitividade entre empresas, o planejamento adequado se torna fundamental para o processo de tomada de decisão, estabelecendo, avaliando e selecionando metas e planos alternativos (BANHARA, 2009).

O planejamento florestal é tradicionalmente dividido de forma hierárquica. As três fases são: planejamento estratégico, planejamento tático e planejamento operacional. Segundo Augustynczyk (2014), o planejamento estratégico visa a colheita sustentável, respeitando a legislação. Tem como principal objetivo o planejamento sobre o uso das terras e tipo de regime silvicultural que será adotado (JASKIU, 2015). O planejamento tático tem o objetivo programar as áreas específicas para a colheita, dentro e numa escala menor de tempo que o planejamento estratégico. Por fim o planejamento operacional concentra-se no gerencialmente semanal ou mensal de trabalhadores e máquinas.

Abaixo será descrito cada nível de planejamento de forma detalhada, conforme apresentado em Mitchell (2004). No planejamento estratégico, os gestores analisam simulações ou otimização de florestas a longo prazo (2-3 rotações) para as tomadas de decisão. Neste nível é necessário determinar a melhor época de colheita de grandes áreas de floresta, a alocação de recursos e expansão da capacidade.

Já o planejamento tático tem um HP de 5 a 10 anos, considerado um planejamento a médio prazo, sendo o problema principal, a localização espacial das áreas de colheita. Para isso é considerado a extensa área da floresta do planejamento estratégico como várias regiões menores chamados de talhões, e cada talhão possui

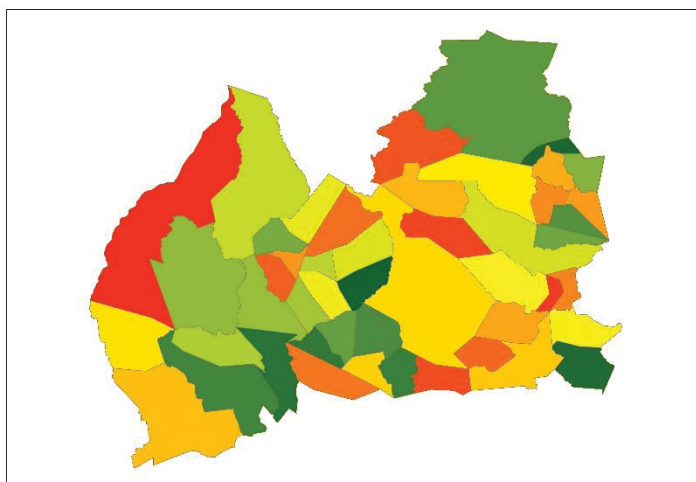
uma localização espacial exclusiva, sendo necessário considerar imposições espaciais para a solução do problema de nível tático. Neste estudo, o planejamento do problema será de nível tático.

Por último, o planejamento operacional é tido como curto prazo, de forma que seu HP seja de 6 semanas a 1 ano, sendo dividido em períodos semanais. Neste nível, a tomada de decisão é em torno da colheita, deslocamento do produto até as serrarias/armazéns (distribuição e roteirização) e fornecimento para os clientes.

As florestas não possuem uma produção estável e fixa, por conta disso é necessário o manejo florestal que tem por objetivo administrar os recursos da floresta, adquirindo benefícios econômicos, sociais e ambientais, incluindo a continuidade de abastecimento de madeira na cadeia de suprimentos (SFEIR et al., 2016). Para cada espécie de árvore é relevante uma forma específica de manejo, tratamentos variados que são afetados pela qualidade do local (solo e clima), material genético das espécies, espaçamento do plantio, entre outros (OLIVEIRA, 2011).

Quanto aos termos técnicos, o povoamento é entendido como a unidade florestal independente, que atenda o tamanho mínimo de uma unidade econômica e administrativa (FUPEF, 2018). Segundo Fupef (2018), talhão é a unidade permanente de divisão espacial da floresta, assim como unidade de planejamento de controle e execução. Na FIGURA 1, é observada uma imagem da representação de uma floresta que possui 48 talhões.

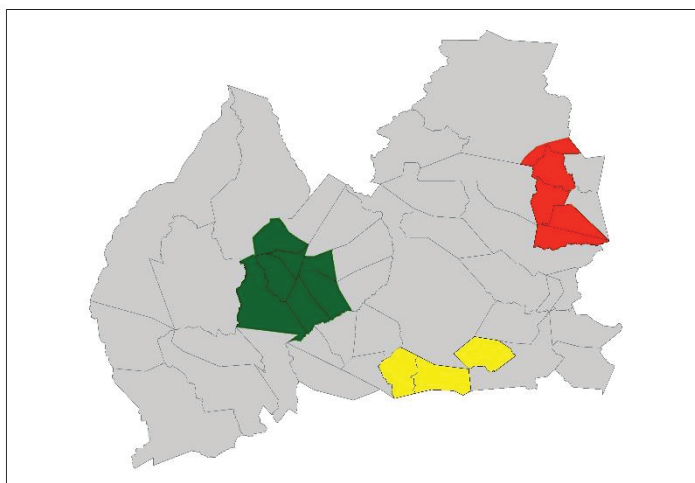
FIGURA 1- REPRESENTAÇÃO DA FLORESTA SUBDIVIDIDA EM TALHÕES



FONTE: A autora (2020).

Os blocos de colheita visam a conectividade e concentração de áreas para o corte no mesmo período. Essa estrutura beneficia a redução do uso de estradas florestais, ou seja, redução no custo de manutenção de estradas, assim como uma redução de custo de deslocamento de maquinários (STANG et al., 2019). Na FIGURA 2, é apresentado a formação de 3 blocos.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DE 3 BLOCOS DENTRO DA FLORESTA



FONTE: A autora (2020).

O Horizonte de Planejamento (HP) corresponde ao período de tempo ao longo do qual serão considerados certos objetivos e restrições. Isso porque há a necessidade de análise de previsões de demandas ao longo do HP, para que sejam tomadas as decisões para cada ação de cada período do HP (FUSCO; SACOMANO, 2007). Todavia, em relação a quantidade apropriada do HP varia de acordo com o nível do planejamento, como já citado na descrição de cada nível no setor florestal. Já a rotação é o intervalo de tempo que ocorre entre o crescimento da muda em uma área definida e de corte raso nesta mesma área (FUPEF, 2018).

A modalidade de corte que será considerado neste trabalho é o corte raso. Segundo Fupef (2018), corte raso é quando o povoamento de um talhão é cortado completamente.

Quando se trata de regulamento, o sistema de certificação florestal dos EUA, para algumas regiões, exige uma restrição de área máxima para o corte de 97 hectares (ha) e uma média máxima de 48,5 ha para unidade de manejo, estas restrições auxiliam na diminuição dos impactos ambientais (JOHN; TÓTH, 2015). A erosão no solo, diminuição do fluxo e qualidade da água de rios, ruptura ou perda de

espécies nativas e beleza cênica são alguns dos impactos ambientais que são diretamente influenciados pela extensão da área de corte (RÖNNQVIST et al., 2015).

No Brasil, não há uma legislação que defina a restrição de área máxima de corte, apesar de explicitar a necessidade de um manejo sustentável. Uma das organizações de reconhecimento mundial, *Forest Stewardship Council* (FSC), utiliza como critério de avaliação ambiental o arranjo dos plantios, que devem proporcionar a proteção, restauração e conservação das florestas. Também consideram a existência de corredores de fauna, distribuição dos talhões em formato de mosaico, com diferentes idades e períodos de rotação como critérios de avaliação (FSC BRASIL, 2014).

É importante descrever que a área máxima para o corte pode variar de país em país, inclusive de região em região, uma vez que o desenvolvimento das árvores é dependente da qualidade do solo e clima. E talvez por conta disso, não existe uma especificidade quanto a área máxima no Brasil, já que abrange uma extensa região florestal, com solos e climas diferenciados em cada região.

2.2 PLANEJAMENTO ESPACIAL DE AGENDAMENTO DE COLHEITA FLORESTAL

Dentro do planejamento tático, das características apresentadas na subseção 2.1, essa pesquisa foca no problema de agendamento de colheita florestal, que lida com a localização espacial das áreas de colheita. Por conta da evolução do Sistema de Informação Geográfica (SIG), um recurso para a análise espacial da floresta, é possível considerar os aspectos espaciais, como a adjacência de talhões para minimizar os impactos ambientais, tornando o ambiente em multiuso e ecologicamente sustentável (MARSHALEK; RAMAGE; POTTS, 2014).

Cada polígono no SIG é um talhão, o objetivo é decidir quais talhões serão agendados para o corte no determinado período do HP, levando em conta, a produtividade do talhão, que está diretamente influenciado com as variáveis do solo (qualidade, inclinação), do povoamento (genética da espécie, número de árvores por hectare) e outras variáveis de decisão do planejamento florestal (SILVA, 2015).

O planejamento do agendamento de corte florestal é considerado uma das principais fases da produção florestal, uma vez que envolve um percentual elevado no custo final do produto, além de proporcionar a minimização dos impactos ambientais (FERRARI; ARCE; LIBANIO, 2019). Na literatura, existem alguns trabalhos

considerando o agendamento de colheita com aspectos ambientais, o mais comum é referente a área de corte (MURRAY; WEINTRAUB, 2002; MCDILL; GEORGE, 2013; DONG et al., 2015; BORGES et al., 2016; CAGLAYAN et al., 2018), mas também existem trabalhos referente a conservação de habitat (KAŠPAR; MARUŠÁK; HLAVATÝ, 2015), diminuição de fragmentação florestal (ÖHMAN; LĂMĂS, 2005; ÖHMAN; WIKSTRÖM, 2008; CONSTANTINO; MARTINS, 2018), preservação cênica (PUKKALA; NUUTINEN; KANGAS, 1995; EGGERS et al., 2018) e estoque de carbono (BACHMATIUK; GARCIA-GONZALO; BORGES, 2015).

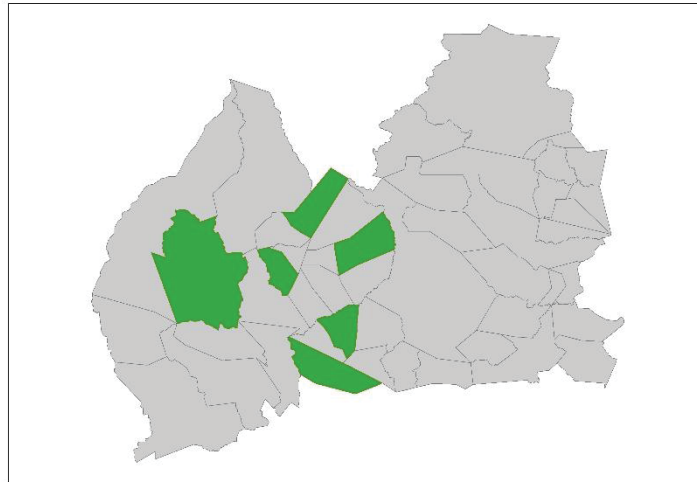
Para Mitchell (2004), o aspecto mais impactante do planejamento tático, no problema de agendamento de colheita florestal, é a inclusão de restrições espaciais. Isto porque, as restrições de adjacências acrescentam significativamente a dificuldade de encontrar uma solução para o problema de agendamento de corte florestal.

2.2.1 *Area Restriction Model (ARM)*

Na literatura a área de corte é um aspecto ambiental muito trabalhado no problema de agendamento de colheita florestal (MURRAY, 1999; MCDILL; REBAIN; BRAZE, 2002; MURRAY; WEINTRAUB, 2002; CONSTANTINO; MARTINS; BORGES, 2008; MCDILL; GEORGE, 2013; GOYCOOLEA et al., 2015; DONG et al., 2015; AUGUSTYNICZIK et al., 2015; BORGES et al., 2016). Ao limitar o corte de áreas contínuas, os impactos da colheita como, erosão do solo, diminuição ou perda de espécies de fauna, diminuição de fluxo do rio e degradação da beleza cênica, são minimizados (RÖNNQVIST et al., 2015).

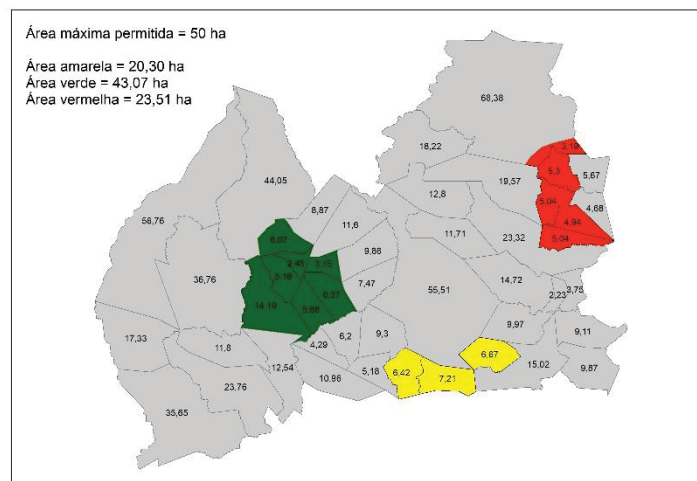
Existem duas abordagens de restrições de área, *Unit Restriction Model (URM)* e *Area Restriction Model (ARM)*. McDill, Rebain e Braze (2002) apresenta a diferença entre as abordagens. O URM se enquadra como restrição que não permite a violação da colheita de duas unidades adjacentes, assim, estaria violando o limite de área máxima. Já a abordagem ARM impõe restrições de área máximas de colheita, de forma que permita a colheita de talhões adjacentes no mesmo período, contanto que a área combinada não exceda a área máxima estabelecida. Na FIGURA 3 é apresentado uma situação de colheita com abordagem URM para um período do HP. Na FIGURA 4 é possível observar que quando imposta a área máxima de 50 ha, os três blocos formados atendem o limite, podendo considerar cada cor como um período do HP ou o mesmo período, já que os três blocos não estão de forma adjacentes.

FIGURA 3 - REPRESENTA A ABORDAGEM URM EM UM PERÍODO DO HP



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 4 - UM EXEMPLO DA ABORDAGEM ARM



FONTE: A autora (2020).

No presente estudo, o modelo que será descrito no capítulo 4 é enquadrada como um modelo de abordagem ARM, já que é permitido o agendamento para o corte de talhões adjacentes, contanto que respeite a área máxima permitida.

A agregação de talhões é a consequência da abordagem ARM levando-se em consideração a área máxima de corte, sendo possível a formação de blocos de talhões para corte no mesmo período. Apesar de ser um tema importante, não recebe atenção na literatura (AUGUSTYNICZIK et al., 2016). A formação de blocos de talhões pode beneficiar na parte econômica do manejo, através da diminuição do custo de

transporte de máquinas de colheita de madeira (HEINONEN et al., 2018) e na redução de construção e manutenção de estradas (ÖHMAN; ERIKSSON, 2010).

2.3 PROBLEMA ABORDADO

Neste trabalho aborda-se o problema de agendamento de colheita florestal de nível tático, considerando um HP de 5 anos e sendo subdividido em períodos anuais, com o objetivo de verificar se o talhão for cortado, em qual período do HP, conforme a otimização do modelo PLIM desenvolvido. A modalidade de corte é o corte raso, uma vez que a seleção do agendamento ocorre para todo o talhão.

É considerada a abordagem ARM, possuindo no modelo PLIM a restrição de área máxima e restrições explícitas de agregação de talhões de tal modo que exista a formação de blocos nos anos do HP.

Desta forma o modelo matemático proposto contempla as seguintes características do problema abordado:

1) A restrição de demanda é considerada como uma variação do alvo pré-determinado, no qual o parâmetro de variação deva ser definido pelo tomador de decisão. Esta restrição é básica para todos os modelos relacionados a este problema e não foi encontrado um trabalho que não contemplasse essa restrição.

2) A garantia de que um talhão, quando selecionado para corte, será cortado somente uma vez ao longo do HP, Esta restrição é encontrada em trabalhos cujo objetivo é maximizar VPL, como por exemplo em Constantino, Martins e Borges (2008); Silva (2015); Kašpar et al. (2016) e Stang (2016).

3) A área total a ser cortada deve estar entre os limites máximos e mínimo, também, pré-definidos pelo tomador de decisão. Estas restrições já foram apresentadas em trabalhos correlatos, porém com abordagens diferentes, como a criação de cluster a priori.

4) Pela importância dada a agregação de talhões, é possível controlar a quantidades de blocos que podem ser abertos, fixando o parâmetro de quantidade de blocos para cada ano. Também é observado que ao considerar a formação de blocos, o modelo equilibra a agregação de blocos e a abordagem ARM, o que não foi muito explorado na literatura. Uma vez que, ao aplicar apenas a abordagem ARM, pode causar a abertura de vários blocos pequenos de forma a respeita a restrição de área

máxima, mas espalhados ao longo da floresta, não sendo a situação mais otimizada economicamente.

5) Por considerar a formação de blocos no mesmo período, existe a restrição de aproximação destes blocos, para fins econômicos. Na prática, ao aproximar os blocos formados para o corte no mesmo período, é possível utilizar as mesmas estradas, reduzindo custos de manutenção e criação das mesmas. Pela agregação de talhões não ser um tema muito considerado no modelo para problema de agendamento florestal, este aspecto não foi considerado em nenhum trabalho correlato, apenas no artigo de Correa e Scarpin (2019).

6) A restrição de aproximação de blocos de anos consecutivos é observado em Correa e Scarpin (2019), a ideia é aproximar os blocos respeitando a restrição de *green-up*, restrição apresentada em vários trabalhos correlatos. Isto porque ao aproximar os blocos de anos consecutivos, é possível se beneficiar economicamente, uma vez que as chances de utilizar estradas com manutenção realizadas em ano anterior é maior, minimizando os custos operacionais.

7) A restrição que controla a abertura de um novo bloco de talhões em um determinado ano é uma restrição inédita. O controle é realizado observando a quantidade de volume supostamente colhido nos blocos já abertos neste mesmo ano e analisando em relação ao limite superior do volume da demanda.

8) Além disso, por considerar todos os talhões da floresta, existe a restrição de idade mínima para o corte, para que respeite o desenvolvimento das árvores, sendo uma adaptação de Fonseca, Cerveira e Mota (2012). Outra restrição desenvolvida é a de talhões selecionados para corte no primeiro ano do HP, que não foi observado algo similar nos trabalhos correlatos, possivelmente, porque se trata de uma situação específica em que se tem pré-determinado alguns talhões para serem colhidos no primeiro ano.

Todos os trabalhos citados nesta descrição serão apresentados com maiores detalhes no capítulo 3.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção apresentam-se os trabalhos correlatos a esta pesquisa, que consideram a agregação de talhões e a abordagem ARM para o agendamento de corte florestal. Além disso, serão descritos os conhecimentos necessários para o desenvolvimento da modelagem matemática, assim como das DV.

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Serão apresentados trabalhos considerados correlatos a esse. Foi considerado, para fins de busca em bases de periódicos, a agregação de talhões e a imposição de restrição de área máxima (abordagem ARM). Estas são características que ocorrem no modelo proposto e se aproxima ao estudo apresentado neste trabalho.

3.1.1 Trabalhos Correlatos

O artigo de Caro et al. (2003) apresenta um modelo PLIM para o problema de agendamento de colheita considerando o período mínimo que blocos adjacentes sejam colhidos em diferentes períodos. Esse tipo de restrição geralmente é chamado de *green-up*. Também considera a área de mancha da floresta. A agregação ocorre de forma a priori, uma vez que é considerado a área máxima permitida para o corte, da abordagem ARM e formando todos os blocos possíveis de talhões adjacentes que a soma das áreas seja inferior a área imposta. Para solucionar o problema foi comparada a solução exata, junto com o tempo computacional realizado no otimizador CPLEX e a heurística *Tabu Search* com movimentos 2-Opt desenvolvido pelos autores.

Goycoolea et al. (2005) apresenta uma modelagem semelhante ao anterior, em que considera ARM a priori, gerando cluster que a soma da área dos talhões adjacentes não ultrapasse a área máxima permitida. Os autores desenvolveram uma melhoria no modelo e nos testes realizados, resultando em redução substancial do tempo de processamento dos respectivos modelos ajustados.

No trabalho de Rempel e Kaufmann (2003) utilizaram duas abordagens para o problema de agendamento de colheita, considerando os objetivos de preservação

de habitat simultaneamente com os objetivos de suprimentos da madeira. A primeira abordagem, de nível estratégico, utilizou uma programação linear, resultando na área anual de colheita. A segunda abordagem, de nível tático, que encontra os blocos e o agendamento de colheita é um modelo usado no programa Stanley. Os autores simularam os modelos considerando restrições de mínima distância entre dois blocos de colheita que serão colhidos no mesmo período, tamanho máximo do bloco, tamanho mínimo do bloco e *green-up* (período de tempo mínimo que deve decorrer para a colheita do bloco vizinho ao bloco que foi colhido). A aplicação foi realizada numa floresta real e analisados os cenários considerando cada espécie de árvores e as consequências das regiões de habitat, ou seja, se o ambiente se apresenta propício ou não para as espécies específicas da fauna que consideraram.

No artigo de Constantino, Martins e Borges (2008), os autores mostraram um modelo de PLIM para a abordagem ARM que tem um número polinomial de variáveis e restrições. Além disso, os autores trataram da situação do *green-up*. Apesar de não necessitar de formação de *cluster* a priori, o modelo causa situações em que o corte raso se compreende como corte de talhões ou unidades de manejo desconectadas (TÓTH; MCDILL; GEORGE, 2013). Ou seja, existe a possibilidade de talhões adjacentes serem selecionados para o corte no mesmo período se atendido a imposição de área máxima, mas há a possibilidade de selecionar talhões não conectados para o mesmo período. Os testes foram realizados em florestas hipotéticas.

Tóth, McDill e George (2013) apresentou dois modelos PLIM de abordagem ARM que necessita de formação de *cluster* a priori já apresentados na literatura e o modelo citado acima. Houve uma melhoria no modelo de Constantino, Martins e Borges (2008) e utilizaram uma abordagem de restrições Lazy (*Lazy constraints*). Para cada modelo existiu um critério para a introdução das restrições Lazy. Foram testados em florestas hipotéticas e reais os três modelos e os três modelos com a abordagem de restrições Lazy. Concluiu-se que quando utilizada a abordagem houve uma melhora no tempo computacional comparado com o modelo exato.

Kadioğullari et al. (2015) apresentou ETÇAPSimülasyon (simulação de planejamento de multiuso baseado em ecossistemas), que auxilia na tomada de decisões no setor florestal gerando simulações do agendamento de colheita florestal ao longo do HP. É levado em consideração os parâmetros espaciais, como distância de abertura de um novo bloco, tamanho máximo do bloco (restrição de área máxima),

green-up e métricas da paisagem, como o tamanho da mancha. O modelo aplicado na simulação é determinístico, e não leva em consideração os aspectos econômicos, sendo impactante apenas para a análise espacial da colheita.

Na dissertação de Silva (2015), o autor descreve três modelos matemáticos para o agendamento de colheita florestal associado aos custos da rede de estradas. Os nomes dos três modelos são: talhão, bloco e misto. Nos três casos, o objetivo é a minimização dos custos de produção ao longo do HP, o modelo talhão tem como o nó do grafo um talhão, ou seja, a tomada de decisão é se colhe ou não um determinado talhão em um determinado período do HP. O modelo bloco, já considera um conjunto de talhões adjacentes e que possui acesso a estrada principal como um nó no grafo. E o modelo misto considera os dois tipos de nós, levando em conta restrições para a exclusão de uma das duas, quando a outra é selecionada. Apesar de não lidar com a agregação de talhões diretamente, por estar considerando a minimização de custos de construção e reforma de trechos de estradas, a colheita irá se concentrar nos talhões que tem acesso as estradas que forem utilizadas no período. O autor observou que houve uma dispersão maior nos cenários em que utilizou o modelo talhão do que os modelos bloco e misto.

No artigo de Kašpar et al. (2016), foi apresentado um modelo matemático de PLIM para o agendamento de colheita considerando aspectos espaciais. Os autores desenvolveram o modelo levando em conta os dados reais de uma produção florestal localizada na região sudeste do Brasil, mas afirmaram que o modelo é flexível e pode ser usado no manejo florestal da Europa Central. O modelo tem o objetivo de maximizar o VPL dos talhões colhidos ao longo do HP. É analisado a formação de cluster a priori e no modelo acrescentado a restrição de caminho, que leva em conta os cluster mínimos inviáveis, ou seja, agrupamentos possíveis que não podem ser colhidos juntos, mas basta remover apenas um talhão do cluster para que a soma de área será viável. Também existe um conjunto de restrição de distância máxima que dois talhões podem se encontrar caso sejam selecionados para o mesmo período do HP, sendo uma restrição de distância máxima, similar a agregação de talhões. Nos testes, os autores observaram que quanto menor a área máxima permitida e quanto menor a distância mínima de agregação permitida, a função objetivo era menor quando considerado vários valores para estes parâmetros.

Stang (2016) em sua dissertação apresentou um modelo PLIM para o problema de agendamento de colheita florestal com o objetivo de minimizar a distância

percorrida nas estradas para realizar os cortes. Foram formados 38 blocos com talhões adjacentes a priori, atendendo a área mínima de 100 ha e área máxima de 350 ha, além da exclusão de talhões consideradas jovens com baixa produção de madeira. A autora comparou o resultado obtido com o modelo matemático num cenário real, com o planejamento tradicional testemunha e verificou a superação que o PLIM obteve.

No artigo de Yoshimoto e Asante (2018), os autores desenvolveram modelos PLIM para o problema de agendamento de colheita. Um dos modelos utiliza restrições do problema de fluxo máximo para considerar a agregação de talhões e a imposição de área máxima. Isto porque foi utilizado a área de cada talhão como o valor do fluxo entre dois talhões adjacentes e existe um nó artificial que exige um fluxo total menor ou igual a um fluxo final, que no caso é uma área final, sendo equivalente a imposição de área máxima.

Importante observar que na maioria dos trabalhos, a aplicação dos modelos e simulação ocorreu num caso de estudo em floresta real. Além disso, a abertura de mais de um bloco em um determinado período é algo que não é controlado pelo modelo.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, serão descritas definições necessárias que fundamentam a pesquisa. A Pesquisa Operacional (PO) é reconhecida como um instrumento para o planejamento. As técnicas de PO são formadas por estratégias lógicas para solucionar os problemas do mundo dos negócios e da indústria, problemas básicos, porém complexos para solucionar. A PO possui um papel importante em todas as áreas de negócios que existam tomadas de decisões. As principais técnicas de PO são: Programação linear, teoria das filas, teoria dos jogos, teoria da decisão e simulação (AHMAD, 2017).

Logo, o setor florestal também utiliza muito de técnicas de PO, já que em todos os níveis de planejamento existem decisões a serem tomadas pelos gestores. A colheita, a abertura e manutenção de estradas, a distribuição e o transporte de produtos são algumas das situações que exigem tomadas de decisões (RÖNNQVIST et al., 2015).

Dentro das técnicas da PO, o presente estudo trabalhará com a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que no seu modelo matemático considera além das variáveis contínuas, as variáveis inteiras e/ou binárias. Por conta dessa característica, PLIM é conhecida como otimização discreta ou combinatória (ARENALES et al., 2007).

Considerando a importância da relação de adjacência de talhões, é necessário a utilização de grafo. A origem da teoria dos grafos é dada ao problema clássico das sete pontes que atravessam o Rio Pregel em Königsberg, de Euler (1736). O desafio deste problema era de passar por todas as pontes, porém apenas uma única vez. Um grafo consiste de dois elementos, a representação gráfica de pontos que representa os nós e a representação gráfica de linhas que equivalem a arestas (BATISTA, 2014).

A formalização matemática do grafo se dá da seguinte forma, seja N um conjunto finito, cujo elementos são chamados de nós e E um conjunto de pares de nós, cujo os elementos (i, j) são chamadas arestas. $G = (N, E)$ é chamado de grafo (ARENALES et al., 2007).

Acrescentar restrições válidas a priori na formulação matemática inicial, antes mesmo da otimização iniciar, é uma forma de melhoria e o nome dado para uma restrição com esta característica é de Desigualdade Válida (DV).

É uma técnica muito utilizada nas PLIM, já que auxilia na diminuição no número de nós a serem explorados pelo algoritmo *branch-and-bound* para encontrar a solução. O objetivo com esta técnica é a obtenção de uma formulação mais rígida sem excluir a solução ótima da região de busca, melhorando os limites inferiores ou superiores, dependendo se são modelos de minimização ou maximização, fornecidos pela solução do modelo relaxado, além da redução do tempo total do processamento computacional (POCHET; WOLSEY, 2006).

O método de planos de corte ou geração de desigualdades válidas em PO, é um método exato para Programação Linear que busca iterativamente refinar um conjunto viável ou função objetivo por meio de inequações lineares. Essas inequações são chamadas de desigualdades válidas ou cortes. Os procedimentos são utilizados para encontrar soluções inteiras ou eliminar regiões não promissoras da região viável ou ainda eliminar soluções idênticas em dois ou mais ramos da árvore *Branch-and-Bound* para problemas de Programação Linear Inteira (PLI), bem como para resolver problemas gerais de otimização convexa. Originalmente, o conceito de planos de corte

para resolver PLI foi introduzido por Gomory (1958) e suas ideias evoluíram para a construção das desigualdades válidas utilizadas na literatura e, também, neste trabalho.

As DV podem ser encontradas/definidas por dois critérios, as técnicas de construção já existentes, por exemplo, o método para encontrar planos de corte de Chvátal-Gomory, ou observar e formalizar características específicas do problema (BURIOL; RITT; COSTA, 2018). Não existe relato de trabalhos na área florestal que utilizam dessa técnica, mas é de grande interesse em outras áreas por exemplo, problemas de roteamento de estoque (*Inventory Routing Problem – IRP*), trabalhos como de Demantova e Scarpin (2018) e Schenekemberg et al. (2020) lidaram com desigualdades válidas para esse problema. Quando se trata de roteamento de estoque, lida-se com tomadas de decisões baseado em grafo, similar ao problema de agendamento de colheita, o que instigou para que a pesquisadora desenvolvesse a pesquisa em cima das DV.

No presente estudo, são apresentadas quatro desigualdades válidas e o processo de busca delas se deu de duas formas. Uma busca na literatura de problemas de alocação e problemas de localidades de instalação em que foram solucionados com DV que se adequaram ao problema. A escolha destes problemas se dá uma vez que, são problemas que lidam com a característica espacial, da mesma forma que o problema de agendamento de colheita florestal.

A outra forma foi considerar o modelo relaxado, variáveis binárias tornam-se relaxadas para valores entre 0 e 1, para encontrar relações entre estas, para então encontrar DV específicas para o problema em questão. E isto é possível já que a DV para o modelo relaxado é também uma DV para o modelo principal (POCHET; WOLSEY, 2006).

A seguir será descrita a referência a qual foi considerada para a adaptação de uma DV a ser aplicado no presente estudo.

3.2.1 Desigualdade Válida no problema de alocação

O artigo de Ghoniem, Flamand e Haouari (2016), foi trabalhado o “*Generalized assignment problem with location/allocation*”, ou seja, o problema de atribuição generalizada com localização/alocação. Um exemplo prático deste tipo de problema é a alocação de espaço de prateleiras em toda a loja de varejo. A ideia intuitiva do

problema seria a junção de vários problemas da mochila, onde cada mochila representaria uma prateleira.

O objetivo é otimizar o local específico dos itens da mochila designada e o espaço total que cada item deve ser alocado dentro dos limites inferiores e superiores pré-determinados. No problema das prateleiras em questão, seria considerar o local específico, se a prateleira está no alto, não adianta colocar produtos pesados, ou deixar na prateleira de baixo produtos frágeis. Além de considerar o espaço total que um produto irá ocupar numa prateleira, considerando peso mínimo e máximo suportado pela prateleira.

Dado o detalhamento do problema, não será apresentada a formulação matemática, uma vez que, não atende os objetivos deste trabalho. Mas será descrito a DV aplicado neste artigo que foi adaptada para o problema de agendamento de corte florestal.

Então considere a variável binária do modelo que foi descrito no artigo como sendo:

$$y_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } j \text{ é designado para o segmento } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A DV em questão considera o conjunto R tal que o item j não pode ser atribuído aos segmentos k_1 e k_2 simultaneamente, porque o espaço máximo que o item j pode ser atribuído não pode cobrir os segmentos selecionados. Logo, os autores desenvolveram a seguinte DV:

$$y_{k_1j} + y_{k_2j} \leq 1 \quad \forall (k_1, k_2, j) \in R \quad (3.1)$$

No capítulo 4 será apresentado o modelo matemático para o problema de agendamento de colheita florestal e então será descrito a restrição adaptada desta DV.

3.3 MODELO PLIM PROPOSTO

O objetivo é a maximização de VPL, o que é muito utilizado na literatura. Dentro dos trabalhos correlatos descritos, é possível verificar que são necessárias

algumas restrições para o problema de agendamento de colheita florestal de nível tático. Estas restrições são usuais na literatura, como, a imposição que se um talhão for selecionado para agendamento, que seja apenas em um único período do HP (CARO et al., 2003; CONSTANTINO; MARTINS; BORGES, 2008; SILVA, 2015; KAŠPAR et al., 2016; STANG, 2016), o controle de volume de produção ao longo do HP e a abordagem ARM que existe em todos os trabalhos correlatos citados. Apesar da restrição de área máxima ser a mesma que apresentada apenas em Constantino, Martins e Borges (2008), já que em outros trabalhos, a abordagem era feita de forma priori, na criação de *clusters*.

As três adaptações realizadas, referem-se primeiro da adaptação da restrição de volume a partir de Silva (2015), a qual apresenta uma cota superior e inferior predefinidos de volume no modelo PLIM desenvolvido, existe a questão do percentual de variação de volume, sendo calculado junto com o modelo. A segunda adaptação é a imposição de máxima distância do trabalho de Kašpar et al. (2016), que no trabalho é feito com uma variável relacionadas a arcos e no modelo desenvolvido, lida com variáveis relacionadas a nós. Por último, a adaptação da restrição de idade mínima para corte retirado no trabalho de Fonseca, Cerveira e Mota (2012).

As restrições relacionadas a agregação de talhões e aproximação de blocos são apresentadas apenas no artigo escrito pela autora (CORREA; SCARPIN, 2019) em que adaptou-se o modelo desenvolvido para comparação com o modelo apresentado por Constantino, Martins e Borges (2008).

Por fim, as duas restrições inéditas apresentadas são referentes ao controle de abertura de blocos, de acordo com o controle de volume e a imposição de talhões para o corte no primeiro ano do HP. Apesar de ter nos trabalhos correlatos a abordagem ARM com a agregação, em nenhum deles lidou com a quantidade de blocos de forma controlada, permitindo a abertura de muitos blocos pequenos e espalhados por toda a floresta para cada ano do HP. Já a restrição para o corte no primeiro ano do HP é relacionada a módulos de colheita presente em um determinado local e escolhendo talhões próximo a este local para ter o mínimo possível de custo de deslocamento e manutenção de estradas. Apesar de ter aplicações práticas, como citado, essa restrição não foi observada em nenhum trabalho correlato.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo contém restrições clássicas no problema de agendamento de colheita florestal, que podem ser encontradas na literatura, tais como uso da variação de volume, consideração da demanda ao longo do HP e garantia de que um talhão, quando agendado para corte, seja cortado em um único período do HP. Além disso, o modelo proporciona um controle na quantidade máxima de abertura de blocos em um mesmo período do HP, o que diferencia em relação a outros modelos da literatura. Também considera a agregação de talhões levando em conta a limitação de corte de áreas adjacentes, uso de área mínima de corte e uso de mais de um sortimento de madeira na modelagem matemática. O modelo atende a dois aspectos conflitantes: econômica e ambiental.

Considerou-se um grafo $G = (N, A)$, definido por um conjunto de nós N e um conjunto de arcos A . Os nós representam os talhões da floresta, assim como os arcos representam a conexão entre pares de nós adjacentes, ou seja, a conexão entre pares de talhões adjacentes. O conjunto de todos nós (talhões) e seus respectivos arcos (conexões) formam o grafo (floresta) base dos problemas abordados. Neste trabalho, a distância entre dois talhões quaisquer será considerada a quantidade mínima de arcos adjacentes que devem ser atravessados para a conexão destes talhões. Para tal, criou-se uma matriz de vizinhança entre talhões, onde a vizinhança é definida por haver ou não fronteira entre dois talhões. Após isso, aplicou-se o algoritmo de Floyd-Warshall (FLOYD, 1962) para a construção da matriz completa de distância entre quaisquer dois talhões (nós) da floresta (grafo). Na TABELA 1, são apresentadas as notações usadas no modelo, seguidas pelas formulações.

TABELA 1 - SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES USADAS E DESCRIÇÃO DAS MESMAS

(continua)

Índices	Descrição
i, k	Talhão: $1, \dots, N$
j	Período do Horizonte de Planejamento: $1, \dots, H$
p	Tipo de produto: $1, \dots, P$
b	Bloco no período j : $1, \dots, B$;

TABELA 1 - SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES USADAS E DESCRIÇÃO DAS MESMAS

(continuação)

Conjuntos	Descrição
I	Conjunto de talhões da floresta
U	Conjunto dos talhões que devem ser cortados no primeiro período do HP
J	Conjunto de período do Horizonte de Planejamento
S	Conjunto de sortimentos
M_j	Conjunto dos blocos no período j
K	Conjunto de pares ordenados de talhões adjacentes
Parâmetros	Descrição
c_{ij}	Valor Presente Líquido gerado pelo talhão i quando colhido no período j
v_{pij}	Volume do sortimento p gerado pelo talhão i quando colhido no período j
d_{pj}	Demanda do sortimento p no período j ;
n_i	Idade do talhão i no primeiro período do HP;
η	Idade mínima para a colheita de um talhão;
φ	Percentual de variação de volume em relação a demanda, em decimais;
a_i	Área do talhão i ;
\bar{A}	Área máxima para a colheita;
\underline{A}	Área mínima para a colheita;
δ_{ik}	Distância em número de arcos do talhão i ao talhão k ;
Δ_{bloco}	Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão no mesmo período e mesmo bloco;
Δ_{ano}	Distância máxima em número de arcos que um talhão pode ficar de outro talhão quando selecionados no mesmo período, mas em blocos diferentes;
Δ_{consec}	Distância máxima em número de arcos que um bloco pode ficar de outro bloco de períodos consecutivos;

TABELA 1 - SUMÁRIO COM AS NOTAÇÕES USADAS E DESCRIÇÃO DAS MESMAS

(conclusão)

Parâmetros	Descrição
τ	Percentual mínima de abertura de um novo bloco para um dado período.
Variáveis binárias	Descrição
x_{ijb}	Assume valor 1 se o talhão i for colhido no período j no bloco b , 0 caso contrário
α_{jb}	Assume valor 1 se o bloco b for gerado no período j , 0 caso contrário

FONTE: A autora (2020).

Maximizar

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^H \sum_{b=1}^B c_{ij} \cdot x_{ijb} \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^N v_{pij} x_{ijb} \geq (1 - \varphi) \cdot d_{pj} \quad \forall p \in S, \forall j \in J \quad (4.2)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^N v_{pij} x_{ijb} \leq (1 + \varphi) \cdot d_{pj} \quad \forall p \in S, \forall j \in J \quad (4.3)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{j=1}^H x_{ijb} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_{ijb} \leq \bar{A} \cdot \alpha_{jb} \quad \forall j \in J, \forall b \in M_j \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i \cdot x_{ijb} \geq \underline{A} \cdot \alpha_{jb} \quad \forall j \in J, \forall b \in M_j \quad (4.6)$$

$$\delta_{ik} \cdot (x_{ijb} + x_{kjb} - 1) \leq \Delta_{bloco} \quad \forall i \in I, \forall k > i \in I, \quad (4.7)$$

$$\forall j \in J, \forall b \in M_j,$$

$$\delta_{ik} \cdot (x_{ijb} + x_{kjh} - 1) \leq \Delta_{ano} \quad \forall i \in I, \forall k > i \in I, \quad (4.8)$$

$$\forall j \in J, \forall b \in M_j,$$

$$h \neq b \in M_j$$

$$x_{ijb} + x_{kjh} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in K, \quad (4.9)$$

$$\forall j \in J, \forall b \in M_j,$$

$$h = b + 1, \dots, B$$

$$x_{ijb} + x_{k(j+1)h} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in K, \forall b \in M_j, \quad (4.10)$$

$$h \in M_j,$$

$$\delta_{ik} \cdot (x_{ijb} + x_{k(j+1)h}) \leq 2 \cdot \Delta_{consec} \quad j = 1, \dots, H - 1$$

$$\forall i \in I, \forall k \in I,$$

$$\forall b \in M_j, h \in M_j, \quad (4.11)$$

$$j = 1, \dots, H - 1$$

$$\alpha_{j1} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4.12)$$

$$\alpha_{jb} \leq \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{(1 + \varphi) \cdot d_{pj} - \sum_{h=1}^{b-1} \sum_{i=1}^N v_{pij} x_{ijh}}{(1 + \varphi) \cdot d_{pj}} \right) \quad \forall p \in S, \forall j \in J, b = 2, \dots, B \quad (4.13)$$

$$(n_i + j - 1) \cdot x_{ijb} \geq \eta \cdot x_{ijb} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in M_j \quad (4.14)$$

$$x_{i11} = 1 \quad \forall i \in U \quad (4.15)$$

$$x_{ijb}, \alpha_{jb} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in M_j, \quad (4.16)$$

$$h \in M_j$$

A função objetivo (4.1) maximiza o Valor Presente Líquido (VPL) dos talhões selecionados para cada período do HP (CONSTANTINO; MARTINS; BORGES, 2008; KAŠPAR et al., 2016; CORREA; SCARPIN, 2019). As restrições (4.2) e (4.3) impõem que seja atendida a demanda considerando um percentual de variação limite φ , possibilitando a geração de mais blocos num determinado período, adaptado de Silva (2015). A restrição (4.4) impõe que os talhões possam ser agendados uma única vez durante o horizonte de planejamento (CARO et al., 2003; CONSTANTINO; MARTINS; BORGES, 2008; SILVA, 2015; KAŠPAR et al., 2016; STANG, 2016). Os conjuntos de restrições (4.5) e (4.6) impõem que a soma da área total agendada em cada período não ultrapasse os limites inferior e superior impostos, respectivamente, considerando agora a abertura ou não do bloco. A restrição de área mínima possibilita que um conjunto de talhões seja agendado apenas se garantir condições mínimas de corte, como por exemplo, compensar o deslocamento do módulo de colheita até a região de corte. Em contrapartida, a imposição de área máxima limita que grandes áreas de corte sejam agendadas, a fim de minimizar impactos ambientais, restrição encontrada em Constantino, Martins e Borges (2008) e Correa e Scarpin (2019).

A restrição (4.7) assegura a agregação dos talhões em um mesmo período e mesmo bloco, conforme determinação da distância máxima de arcos entre talhões definida pelo parâmetro Δ_{bloco} . Dentro das condições, é considerado $\forall i, \forall k > i$, ou seja, ao comparar a distância entre dois talhões, o índice k deveria ser diferente a i , uma vez que não faz sentido a comparação da distância de um único talhão. Porém, como a distância calculadas pela Floyd-Warshall do talhão i para o talhão k , é a mesma do talhão k para o talhão i , por isso é considerado $\forall k > i$ uma vez que atende a comparação com todos os talhões e diminui a quantidade de restrições, contribuindo no tempo computacional para encontrar a solução. Já o conjunto de restrições (4.8) impõe a agregação entre talhões de blocos diferentes formados no mesmo período, considerando a quantidade máxima de arcos Δ_{ano} . Na prática, a restrição (4.7) agrega os talhões para a formação de um bloco (4.8) aproxima os blocos em um período, isto contribui para a diminuição de custos, por exemplo, de manutenção de estradas. Essas restrições são encontradas em Correa e Scarpin (2019).

O conjunto da restrição (4.9) impõe que talhões adjacentes não sejam colhidos no mesmo período em blocos diferentes, pois isto causa uma continuidade na área de corte e ultrapassaria a área máxima de corte que está definida para cada bloco. A restrição (4.10) impede que talhões adjacentes sejam selecionados em

períodos consecutivos, conhecido na área florestal como restrição de *green-up*. Os efeitos ambientais desse impedimento possibilitam que a fauna, presente nos talhões agendados para corte, possa se deslocar até uma área sem perturbação. Restrições adaptadas de Correa e Scarpin (2019).

A restrição (4.11) aproxima blocos de talhões de períodos consecutivos, oportunizando ganhos econômicos e ambientais, pois possibilita a reutilização de partes das estradas beneficiadas do período anterior, fazendo com que o custo de manutenção possa ser minimizado. Dessa forma, a unidade de manejo é perturbada em apenas parte de sua extensão. Além de que, essa restrição pode proporcionar menor deslocamento dos módulos de colheita entre um período e outro. Apresentado em Correa e Scarpin (2019).

A restrição (4.12) impõe que para todo período exista a abertura de um bloco, impondo-se ao modelo que pelo menos um bloco seja aberto por período. O conjunto da restrição (4.13) garante a abertura de mais de um bloco considerando o volume colhido no(s) bloco(s) anterior(es). Quando a necessidade de corte corresponder a um percentual inferior a τ , essa restrição não permite a abertura de um novo bloco. Considerando uma situação hipotética em que haja necessidade de 20% de volume de corte e o τ corresponda a 10%, assim a multiplicação à direita da desigualdade resultará em 2, ou seja, esse valor possibilitará a variável α_{jb} assumir o valor 1, equivalendo a abertura de um novo bloco em um determinado período.

O conjunto de restrições (4.14) garante que seja respeitado o agendamento de talhões com idade mínima de corte, não sendo permitido o corte de talhões que possuam idades inferiores a η , adaptado de Fonseca, Cerveira e Mota (2012). A restrição (4.15) impõe que os talhões pertencentes ao conjunto U sejam colhidos no primeiro período do HP, tornando possível o agendamento de talhões próximos às respectivas áreas de corte. A restrição (4.16) garante que as variáveis de decisão assumam valores binários.

4.1 DESIGUALDADES VÁLIDAS

O processo para encontrar as DV foi descrito no capítulo 3. Serão apresentadas as três DV encontradas a partir da relaxação do modelo e da análise das relações das variáveis respostas obtidas.

$$\sum_{b=1}^B x_{ijb} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4.17)$$

A lógica desta DV é que apesar de ter a restrição (4.4), o modelo principal quando relaxado observou-se que mesmo nos casos em que um talhão estava bem determinado para um certo período, o talhão foi designado em blocos distintos. Assim, a DV (4.17) considera que para qualquer talhão e qualquer período, o talhão será designado, em apenas um bloco do período.

$$\sum_{i=0}^N x_{ijb} \leq N \cdot \alpha_{jb} \quad \forall j \in J, \forall b \in M_j \quad (4.18)$$

A DV (4.18) apresenta a relação entre as variáveis, uma vez que apenas quando o bloco b é gerado, ou seja, $\alpha_{jb} = 1$, para um determinado período j , que os talhões podem ser selecionados para o corte neste bloco. Outra forma de escrever matematicamente esta imposição é mostrado a seguir na DV (4.19).

$$x_{ijb} \leq \alpha_{jb} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall b \in M_j \quad (4.19)$$

É visível que a DV (4.19) gera um conjunto de restrições maior que DV (4.18) uma vez que considera $\forall i \in I$. Será apresentado a DV adaptada do problema de atribuição generalizada com localização/alocação (GHONIEM; FLAMAND; HAOUARI, 2016) . Seja $R = \{(i, j) | \delta_{ij} > \Delta_{bloco}\}$, ou seja R é o conjunto de par ordenados de talhões que possuem distância maior que a distância máxima permitida para a agregação de talhões do mesmo bloco. Logo,

$$x_{ijb} + x_{kjb} \leq 1 \quad \begin{matrix} \forall (i, k) \in R, \forall j \in J, \\ \forall b \in M_j \end{matrix} \quad (4.20)$$

A DV (4.20) implica que se dois talhões estão mais distantes que o permitido, então não tem como selecionar os dois talhões para o mesmo bloco.

5 TESTES COMPUTACIONAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 3 é possível verificar que a maioria dos trabalhos correlatos utilizaram uma base de dados reais. Para validação das desigualdades válidas é necessário um número considerável de base de dados. No site <http://ifmlab.for.unb.ca/fmos/datasets/> foi encontrado algumas bases de dados de florestas, reais ou hipotéticas, utilizadas na literatura. Destas, foram selecionadas quatro bases de acordo com a quantidade de talhões e se a representação da floresta em forma de grafo era conexa.

Por conta dessa escassez de base de dados, para os testes necessários, foi elaborado um criador de cenários hipotéticos, a qual será descrito a seguir.

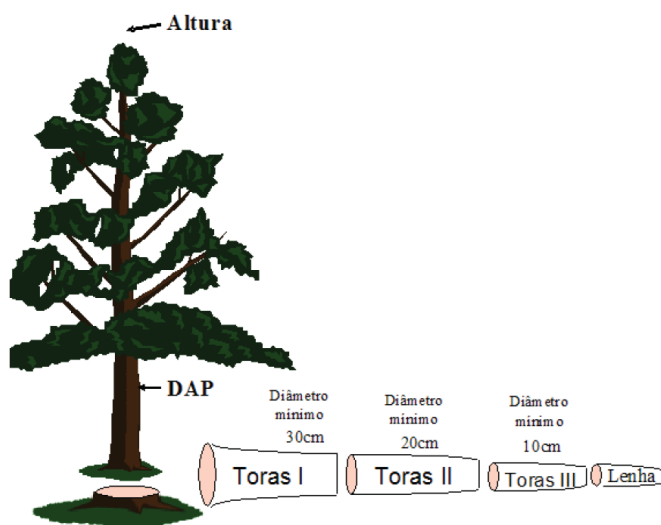
O modelo, suas variações e todos os programas construídos foram desenvolvidos no Visual Studio 2017 em linguagem C# e resolvidos por meio do *software* Gurobi 8.1 (GUROBI OPTIMIZATION, 2018), em um computador com processador Intel® Core™ i7-5500U, 2.40 GHz e 8.0 Gb de RAM.

5.1 CRIAÇÃO DE CENÁRIOS

Para a criação dos cenários hipotéticos considerou-se como base de dados de desenvolvimento a espécie *Pinus taeda* L.. A partir do simulador de crescimento e produção de Pinus chamado SisPinus (EMBRAPA, 1995), desenvolvido pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária), foram realizadas as prognoses de crescimento e produção. As condições iniciais para a simulação foram: regime de manejo corte raso, uma floresta com 1.600 árvores/hectare, porcentagem inicial de sobrevivência de 95%, índice de sítio de 21 metros e a produção de dois tipos de produtos: celulose e serraria.

Foram considerados parâmetros no SisPinus para a classificação dos tipos de produtos. No caso do sortimento celulose, foi definido o diâmetro mínimo de 8 cm, diâmetro máximo de 17,99 cm e comprimento de 2,40 m. Em relação ao sortimento serraria, foram escolhidos o diâmetro mínimo de 18 cm e o comprimento de 2,60 m. Na FIGURA 5 é possível verificar uma situação didática em que existe a separação de sortimentos de acordo com o diâmetro mínimo das toras.

FIGURA 5 - SORTIMENTOS DE UM TRONCO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DAS TORAS



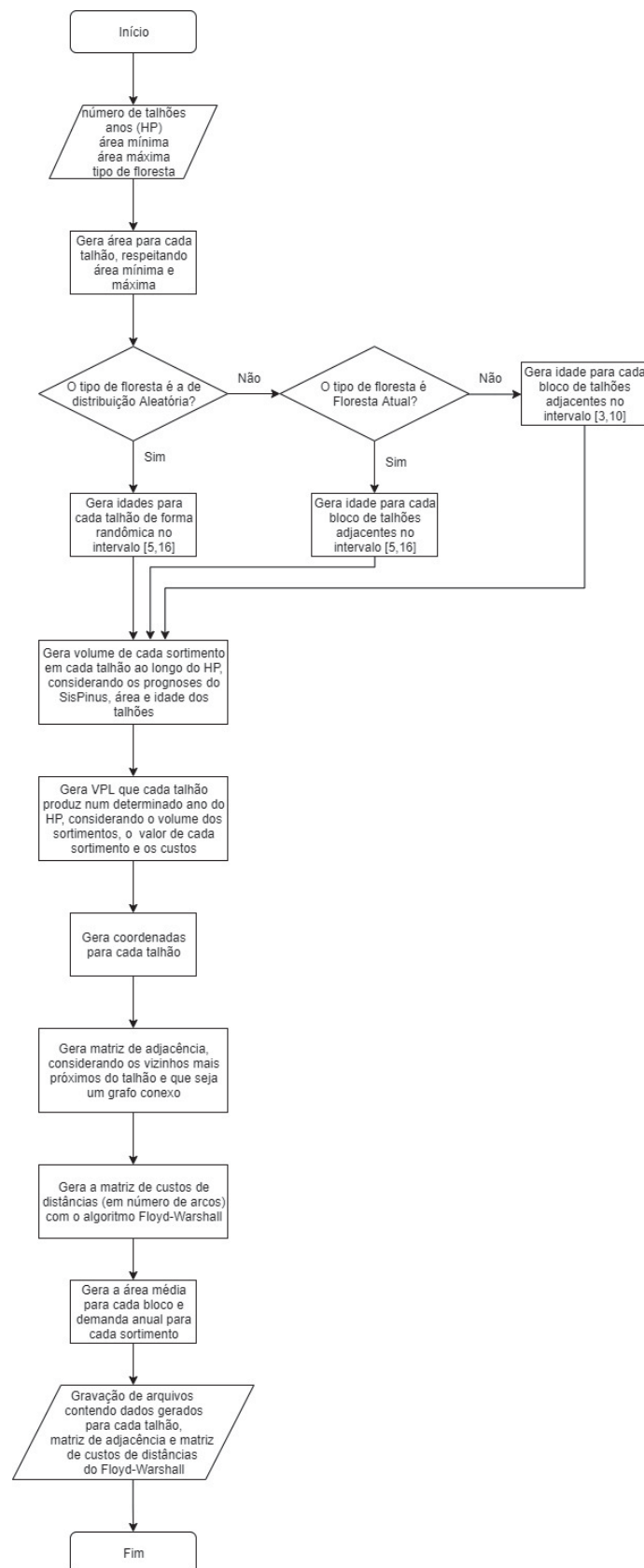
FONTE: Oliveira (2011).

A partir destes parâmetros, a simulação do crescimento e produção foi realizada com idades de 1 a 20 da árvore no momento do corte. Assim foi possível registrar o volume de cada produto que uma árvore gera em cada idade do intervalo citado acima.

Os valores hipotéticos usados como receita dos sortimentos celulose e serraria foram estabelecidos em 70 R\$/m³ e 110 R\$/m³, respectivamente. Para chegar próximo de um caso real, foram considerados o custo de colheita florestal de 28 R\$/m³ e o custo administrativo 150 R\$/ha/ano.

Após o tratamento de todos os dados foi possível programar um algoritmo que gerasse cenários, o processo todo é detalhado no fluxograma apresentado como FIGURA 6. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem C# no Visual Studio, possibilitando o desenho da espacialização da floresta, já que é parte fundamental para validação do modelo matemático. Além disso, a programação retorna arquivos tabelados dos dados de cada talhão, a matriz de adjacência e a matriz de custos resultante do algoritmo Floyd-Warshall, dados necessários como parâmetros no modelo matemático. A criação de cenários pode ser adaptada para qualquer outra espécie, sendo necessário apenas o conhecimento da simulação do crescimento da mesma.

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE CRIAÇÃO DE CENÁRIOS



FONTE: A autora (2020).

Foram considerados para a geração dos cenários, três tipos de florestas, classificados como floresta atual, futura e de distribuição aleatória. Essa classificação é baseada na distribuição de idades das árvores de cada talhão, as florestas atual e futura possuem a distribuição em blocos de talhões adjacentes, uma vez que se aproxima da situação real, em que o plantio de um certo ano é realizado em um bloco de talhões. A diferença entre eles é que a floresta atual apresenta idades mais próximas da idade inicial de colheita, que segundo Moreira e Oliveira (2017) é de 13 anos para as espécies de *Pinus* spp. colhidas em florestas comerciais no Brasil. A floresta futura possui talhões com idades inferiores a 13 anos.

Para saber os parâmetros de área mínima e máxima, uma vez que para cada cenário, existia uma distribuição aleatória da área de cada talhão, foi elaborado uma conta básica para saber a área mínima e máxima de cada bloco de colheita. Seja A_{total} a soma das áreas de todos os talhões da floresta e retomando H como a cardinalidade do conjunto de anos no HP e B o número máximo de blocos permitidos para a abertura num determinado período. Então a equação a seguir apresenta uma média de área por bloco para cada ano.

$$\frac{A_{total}}{HB} \quad (5.1)$$

A partir desta média, foi considerado a área mínima o maior múltiplo de 50 menor que a média e a área máxima o menor múltiplo de 50 maior que a média. Por exemplo, se a média foi de 246 ha, logo a área mínima será de 200 ha e a máxima de 250 ha. Já para determinar a demanda, por existir um volume gerado diferente ao longo do HP, foi necessário considerar a média das somas de volume de cada sortimento gerado em cada ano. Então seja V_{pj} o volume do produto p gerado em toda a floresta no ano j , com $p = 1, \dots, P$ e $j = 1, \dots, H$, A média da capacidade de produção do volume de cada sortimento pela floresta toda é descrito na fórmula seguinte.

$$V_{med} = \frac{\sum_{j=1}^H V_{pj}}{H} \quad (5.2)$$

Como é a média do volume gerado pela floresta toda, é preciso dividir pelo número do HP, para saber o volume aproximado para cada ano. Além disso foi

multiplicado por 0,75 para que não ficasse um volume muito elevado, que poderia causar infactibilidade no modelo.

$$0,75 \cdot \frac{V_{med}}{H} \quad (5.3)$$

Assim a demanda para os cenários hipotéticos é o valor encontrado em (5.3), no caso real haveria uma estimativa da demanda futura de cada sortimento, considerando o mercado do setor florestal.

A variação de demanda φ foi fixado em 15%, a distância máxima considerada na agregação de talhões no mesmo bloco Δ_{bloco} foi de 4 arcos, a distância máxima para a agregação de talhões de mesmo ano Δ_{ano} foi de 6 arcos e a distância máxima para aproximação de blocos de 10 arcos.

Fixou-se a abertura de no máximo 3 (B) blocos em cada ano do HP e utilizou-se $\tau = 0,20$ para representar o percentual mínimo de abertura de um bloco para um período.

A nomenclatura utilizada nas DV será considerada DV1 para a DV (4.17), DV2 para a DV (4.18), DV3 para DV (4.19) e DV4 para DV (4.20). Quando existir nomenclatura com dois ou três algarismos representa a combinação de dois ou três DV, por exemplo, se a nomenclatura for DV24, significa que o modelo possui as DV (4.18) e (4.19). Na TABELA 2 é descrito o nome dos modelos e as restrições respectivas.

TABELA 2 - NOMES DOS MODELOS UTILIZADOS EM CADA CENÁRIO E AS RESPECTIVAS RESTRIÇÕES

(continua)

Nome	Restrições
Original	(4.1) - (4.13), (4.16)
Original_Id	(4.1) - (4.14), (4.16)
Original_R	(4.1) - (4.16)
DV1	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17)
DV2	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.18)
DV3	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.19)
DV4	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.20)
DV12	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17), (4.18)
DV13	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17), (4.19)
DV14	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17), (4.20)

TABELA 2 - NOMES DOS MODELOS UTILIZADOS EM CADA CENÁRIO E AS RESPECTIVAS RESTRIÇÕES

(conclusão)

Nome	Restrições
DV24	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.18), (4.20)
DV34	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.19), (4.20)
DV124	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17), (4.18), (4.20)
DV134	(Original ou Original_Id ou Original_R), (4.17), (4.19), (4.20)

FONTE: A autora (2020).

As combinações das DV (4.18) e (4.19) não foram consideradas, uma vez que se referem a mesma situação.

Os cenários que foram propostos neste trabalho estão resumidos na TABELA 3. Nesta tabela apresenta-se o nome do cenário, as características da floresta como número de talhões, número de anos do HP, área mínima e máxima dos talhões e a distribuição de idades nos talhões. A descrição de cada característica será apresentada a seguir:

- Característica A: Quantidade de talhões;
- Característica B: Quantidade de anos no HP;
- Característica C: Área mínima de um talhão;
- Característica D: Área máxima de um talhão;
- Característica E: Distribuição de idade – Aleatória (Al), Futura (F) e Atual (At).

Também é observado o número de variáveis e o número de restrições gerado no modelo Original para cada cenário.

TABELA 3 - CENÁRIOS PROPOSTOS COM SUAS CARACTERÍSTICAS

(continua)

Cenário	Nome	Características					Modelo Original	
		A	B	C	D	E	Nº de variáveis	Nº de restrições
1	30t3a10.70V1	30	3	10	70	At	279	31.206
2	30t3a10.70V3	30	3	10	70	At	279	31.530
3	30t3a10.70V4	30	3	10	70	At	279	34.878
4	30t3a10.70V5	30	3	10	70	At	279	31.800
5	40t3a10.70V1	40	3	10	70	At	369	54.211
6	40t3a10.70V2	40	3	10	70	At	369	58.747
7	40t3a10.70V3	40	3	10	70	At	369	54.589

TABELA 3 - CENÁRIOS PROPOSTOS COM SUAS CARACTERÍSTICAS

(conclusão)

Cenário	Nome	Características					Modelo Original	
		A	B	C	D	E	Nº de variáveis	Nº de restrições
8	40t3a10.70V4	40	3	10	70	At	369	59.125
9	40t3a10.70V5	40	3	10	70	At	369	55.021
10	50t3a10.70A1	50	3	10	70	Al	459	83.516
11	50t3a10.70A2	50	3	10	70	Al	459	89.186
12	50t3a10.70N1	50	3	10	70	F	459	83.516
13	50t3a10.70N2	50	3	10	70	F	459	89.186
14	50t3a10.70V1	50	3	10	70	At	459	83.516
15	50t3a10.70V2	50	3	10	70	At	459	89.186
16	50t5a10.70A1	50	5	10	70	Al	765	155.348
17	50t5a10.70A2	50	5	10	70	Al	765	166.058
18	50t5a10.70N1	50	5	10	70	F	765	155.348
19	50t5a10.70N2	50	5	10	70	F	765	166.058
20	50t5a10.70V1	50	5	10	70	At	765	155.348
21	50t5a10.70V2	50	5	10	70	At	765	166.058
22	80t5a10.30A1	80	5	10	30	Al	1.215	388.973
23	80t5a10.30A2	80	5	10	30	Al	1.215	406.007
24	80t5a10.30N1	80	5	10	30	F	1.215	388.973
25	80t5a10.30N2	80	5	10	30	F	1.215	406.007
26	80t5a10.30V1	80	5	10	30	At	1.215	388.973
27	80t5a10.30V2	80	5	10	30	At	1.215	406.007
28	80t5a10.70A1	80	5	10	70	Al	1.215	388.973
29	80t5a10.70A2	80	5	10	70	Al	1.215	406.007
30	80t5a10.70N1	80	5	10	70	F	1.215	388.973
31	80t5a10.70N2	80	5	10	70	F	1.215	406.007
32	80t5a10.70V1	80	5	10	70	At	1.215	388.973
33	80t5a10.70V2	80	5	10	70	At	1.215	406.007
34	100t5a10.70A1	100	5	10	70	Al	1.515	603.223
35	100t5a10.70A2	100	5	10	70	Al	1.515	624.541
36	100t5a10.70N1	100	5	10	70	F	1.515	603.223
37	100t5a10.70N2	100	5	10	70	F	1.515	624.541
38	100t5a10.70V1	100	5	10	70	At	1.515	603.223
39	100t5a10.70V2	100	5	10	70	At	1.515	624.541

FONTE: A autora (2020).

Os cenários 1 a 9 foram considerados como cenários pequenos, levando em conta o número de talhões, com isso, era possível deixar rodando os testes até a solução ótima a fim de comparação das DV. Os resultados obtidos serão detalhados em 5.1.1 cenários pequenos. Os cenários 10 a 39, foram criados para analisar a convergência do modelo e também das DV quando considerado uma quantidade

maior de talhões na floresta, simulando tamanhos próximos aos reais. Os respectivos resultados se encontram em 5.1.2 cenários com tempo de processamento de nível tático.

Alguns cenários foram selecionados para serem testados nos modelos Original_Id e Original_R. Nas subseções 5.1.3 Considerando restrição de idade mínima e 5.1.4 Considerando a imposição de talhões para corte no primeiro ano do HP, são descritos os resultados dos respectivos grupos de testes. Na TABELA 4, é observado o número de variáveis e o número de restrições quando considerados estes modelos.

TABELA 4 - NÚMERO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES DOS MODELOS ORIGINAL_ID E ORIGINAL_R CONSIDERANDO DETERMINADOS CENÁRIOS

Cenário	Nome	Características					Modelo Original_Id	
		A	B	C	D	E	Nº de variáveis	Nº de restrições
40	80t5a10.30V1	80	5	10	30	At	1.215	390.173
41	80t5a10.30V2	80	5	10	30	At	1.215	407.207
42	80t5a10.70V1	80	5	10	70	At	1.215	390.173
43	80t5a10.70V2	80	5	10	70	At	1.215	407.207
44	100t5a10.70V1	100	5	10	70	At	1.515	604.723
Cenário	Nome	Características					Modelo Original_R	
		A	B	C	D	E	Nº de variáveis	Nº de restrições
45	80t5a10.30V1	80	5	10	30	At	1.215	388.977
46	80t5a10.30V2	80	5	10	30	At	1.215	406.011
47	80t5a10.70V1	80	5	10	70	At	1.215	388.977
48	80t5a10.70V2	80	5	10	70	At	1.215	406.011
49	100t5a10.70V1	100	5	10	70	At	1.515	603.227
50	100t5a10.70V2	100	5	10	70	At	1.515	624.545

FONTE: A autora (2020).

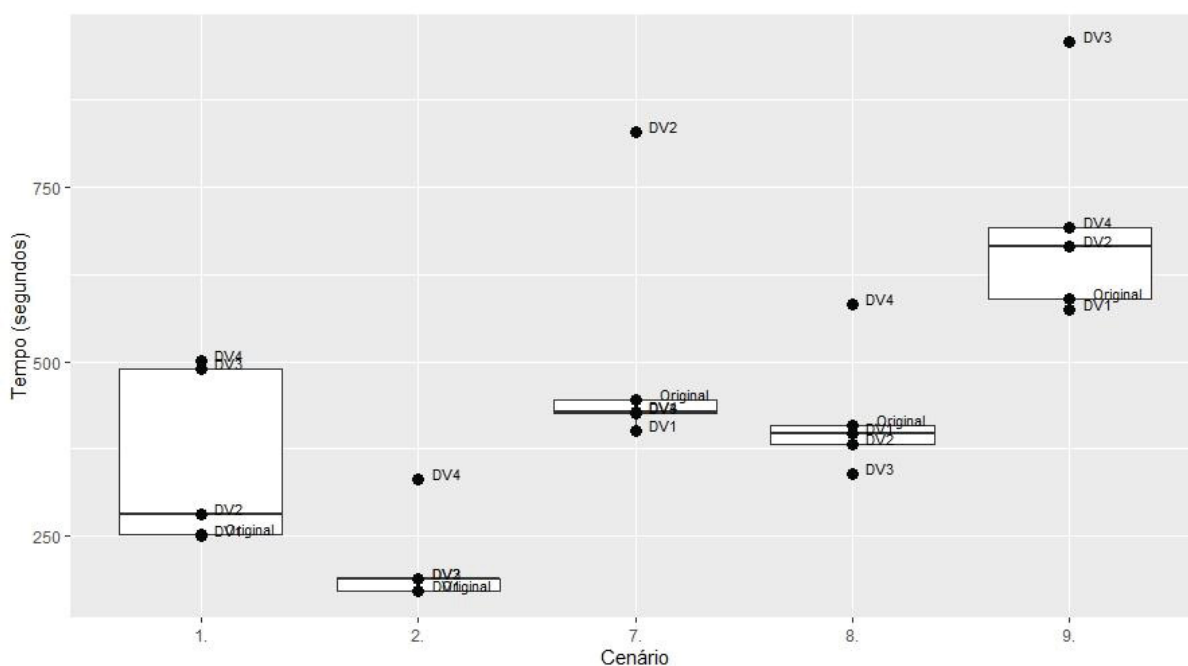
5.1.1 Cenários pequenos

Os primeiros cenários são de florestas pequenas justamente para verificar a potencialidade das DV ao rodar até encontrar o ótimo. Os cenários se referem a florestas com 30 ou 40 talhões, um HP de 3 anos e área mínima de 10 ha e máxima de 70 ha. O tipo de floresta que foi considerado é a floresta madura, por se tratar de florestas pequenas, não faria sentido tratar de uma floresta com idades novas para colheita ou a de distribuição aleatória. Não foram considerados as restrições de idade

máxima (4.14) e imposição da região para o primeiro ano do HP (4.15), isto porque por se tratar de florestas pequenas, poderia tornar o modelo infactível.

A tabela do APÊNDICE 1 apresenta os tempos computacionais dos cenários de cada modelo, com as DV. Observou-se que no cenário 2 nenhum modelo com DV superou o tempo computacional do modelo Original. Considerando que no total são 9 cenários com soluções ótimas, a tabela do APÊNDICE 2 apresenta a quantidade de tempos inferiores de cada DV em relação ao modelo Original. A DV que mais se mostrou promissor é a DV1, já os piores seriam a combinação DV24 e DV134. Das 11 combinações realizadas de DV, em 4 delas a quantidade de tempos inferiores foi acima da metade dos cenários. As médias percentuais refletem isso, já que a maioria apresenta percentual negativo, significando que houve um aumento no tempo computacional quando consideradas as DV. Porém, o pior caso é o aumento de mais de 100% quando considerada a combinação DV134 das desigualdades válidas, sendo perceptível na tabela do APÊNDICE 1 que a o aumento em segundos é muito pequeno. O único que houve uma discrepância acentuada, em relação ao tempo do modelo Original, foi o modelo DV134 no cenário 5, com um percentual de aumento de tempo computacional de 529%.

FIGURA 7 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS PEQUENOS REFERENTE AO TEMPO DE SOLUÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Observando a FIGURA 7 em que se apresenta alguns cenários com seus tempos computacionais para se chegar na mesma solução ótima, comparando o tempo de processamento do modelo Original com os modelos com as desigualdades válidas, DV1, DV2, DV3, DV4, foi possível afirmar que destas 4 combinações de DV, a pior é a DV4, sendo representada como outliers superiores em 3 cenários. Além disso, confirma o fato da DV1, possuir um dos melhores tempos computacionais.

Analisando apenas o modelo Original, verificou-se que apesar de ser florestas com poucos talhões, o que representa poucos nós no grafo, o modelo é promissor pois trabalhou com dois tipos de sortimentos e em apenas um dos dez cenários chegou em infactibilidade. A análise espacial será realizada a seguir com cenários de florestas com mais talhões para que se possa verificar a agregação de talhões.

5.1.2 Cenários com tempo de processamento de nível tático

Nesta seção será considerada floresta com mais talhões, tentando chegar próximo a uma situação real. Por se tratar de um problema de nível tático, o agendamento de colheita florestal não necessita de uma resposta imediata. Os cenários a seguir apresentam cenários com 50, 80 ou 100 talhões, HP de 3 ou 5 anos, área mínima de 10 ha, área máxima (AM) de 30 ou 70 ha, possuem distribuição de idades (DI) de uma floresta atual (at), floresta futura (f) e floresta de distribuição aleatória de idades (al). Foram gerados 30 cenários e o tempo limite de processamento foi de 7.200 segundos (2 horas). Logo, considerando 30 cenários com soluções factível, cinco cenários chegaram na solução ótima e 25 cenários que tem GAP, que é o percentual da diferença entre o maior limite inferior conhecido e o menor limite superior conhecido, fornecendo uma medida do quão longe o resultado está do ótimo global.

A tabela com os detalhes da solução encontrada em cada modelo se encontra no APÊNDICE 3. A tabela no APÊNDICE 4 apresenta a quantidade de vezes em que cada DV e suas combinações foram melhores que o modelo Original, tanto no tempo computacional relacionado ao 5 cenários, quanto no GAP relacionado aos 25 cenários.

É observado que os modelos DV1 e DV24 apresentam as melhores médias percentuais, sendo considerados as melhores combinações de DV. Porém quando observa a quantidade em que um modelo com DV foi melhor que o modelo Original,

o modelo DV13 foi melhor em 17 cenários dos 30. Quando se analisa a média percentual da redução de GAP, os valores são pequenos pois a diferença do GAP do modelo Original e de um modelo de combinação de DV é pequeno, uma vez que se observou que o modelo Original converge lentamente quando o GAP está abaixo de 3%.

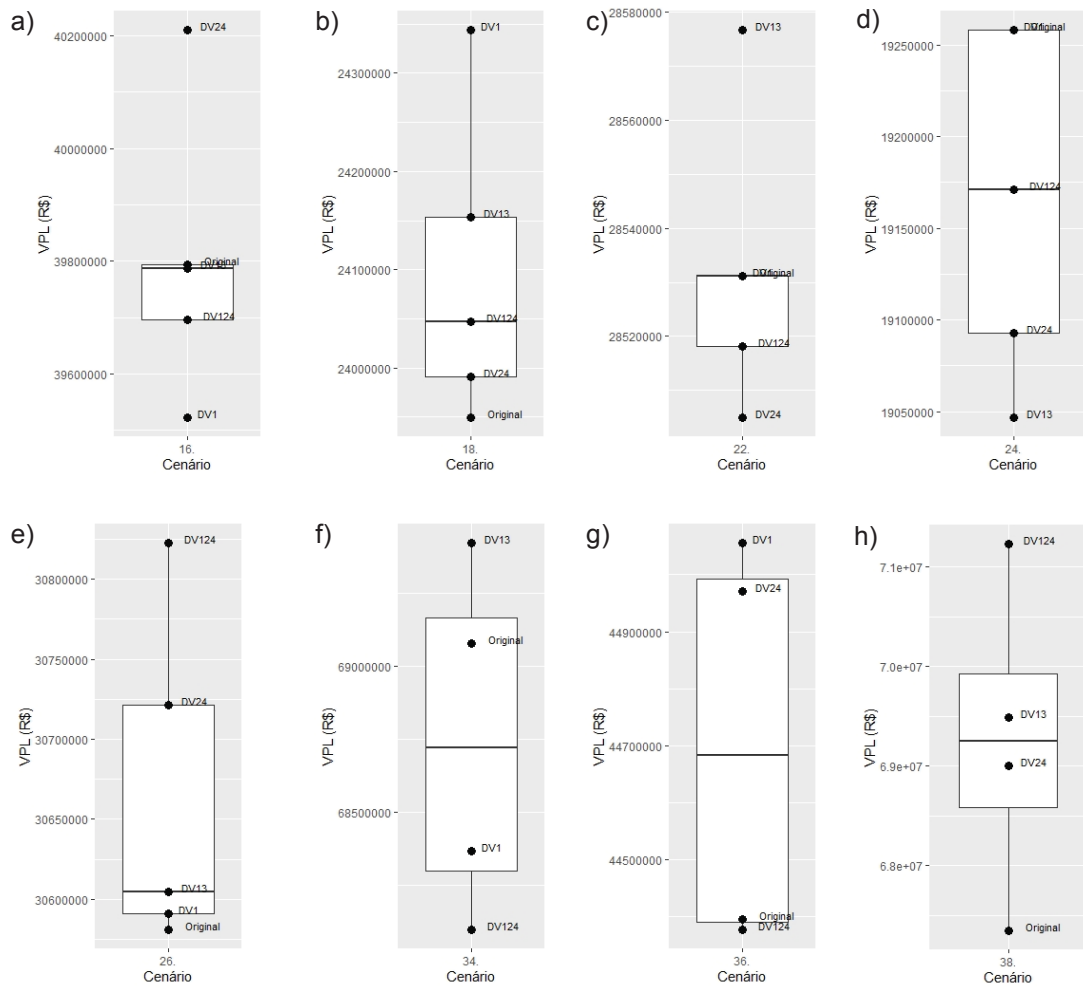
Houve situações em que o modelo Original apresentou uma solução viável, mas num dos modelos com combinações de DV, em 2h de processamento não apresentou resposta. Ou seja, não se chegou que o problema é inviável ou viável. Na seção anterior foi apresentado um caso em que o modelo DV134, para encontrar o ótimo, teve um aumento de tempo de 529% em relação ao tempo de processamento do modelo Original, provável que aconteça situações assim para os 30 cenários se não houvesse imposição de tempo limite.

Levando em conta as combinações de DV que mais se destacaram, tanto positivamente como negativamente, a FIGURA 8 apresenta boxplot referente ao valor do VPL encontrado em cada modelo, para alguns cenários. Nos cenários que as combinações de DV não obtiveram a resposta, foi analisado apenas com os resultados viáveis obtidos. Nesta análise, as combinações mais no superior, houve um desempenho melhor, uma vez que o objetivo era de maximizar o VPL. Assim, é possível verificar que nos cenários apresentados na FIGURA 8, as combinações DV1 e DV124 possuem melhores VPL, representados como outliers superiores, confirmando a análise da tabela da APÊNDICE 4.

Outra avaliação que é possível fazer com boxplot, é referente ao percentual de GAP, conforme a FIGURA 9. Os GAP apresentados, correspondem aos mesmos cenários e combinações de DV da FIGURA 8.

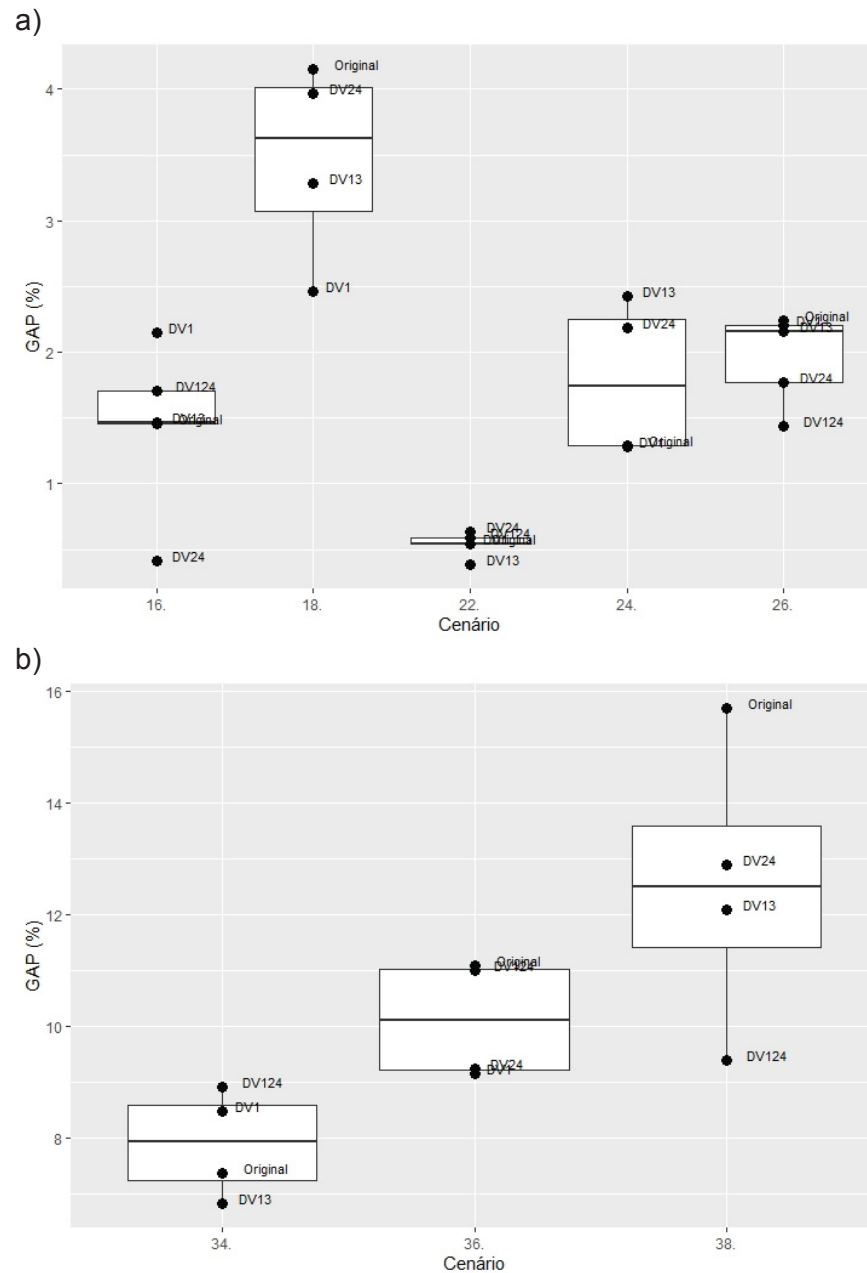
Observando estes boxplots, quando se trata de percentual de GAP, quanto menor este percentual, melhor desempenho a combinação DV teve. No caso, só reforça a análise já feita. É possível observar que no cenário 18, o modelo Original obteve o pior desempenho em comparação com as combinações de DV, uma vez que o GAP do modelo Original nesse cenário, foi o maior.

FIGURA 8 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO REFERENTE AO VPL DA SOLUÇÃO



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 9 - BOXPLOT DE ALGUNS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO REFERENTE A GAP DE CADA SOLUÇÃO



FONTE: A autora (2020).

Apenas em um cenário, no caso cenário 17, o GAP do modelo Original foi inferior que dos modelos de combinação de DV como observado na TABELA 5. Neste cenário o pior resultado foi obtido pelo DV34, que apesar da diferença do GAP ser pouca, a diferença no VPL é de redução de um pouco mais de R\$ 400.000,00.

TABELA 5 - RESULTADOS DO CENÁRIO 17 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS

50t5a10.70A2		
N=50; H=5; AM=70; F=AI		
	VPL (R\$)	GAP (%)
Original	R\$ 33.982.941,40	2,29
DV1	R\$ 33.646.432,20	3,31
DV2	R\$ 33.840.756,60	2,72
DV3	R\$ 33.657.045,20	3,28
DV4	R\$ 33.836.675,80	2,73
DV12	R\$ 33.690.902,60	3,18
DV13	R\$ 33.619.555,20	3,40
DV14	R\$ 33.782.184,20	2,90
DV24	R\$ 33.825.562,60	2,76
DV34	R\$ 33.582.776,60	3,51
DV124	R\$ 33.789.725,60	2,87
DV134	R\$ 33.726.165,60	3,07

FONTE: A autora (2020).

A TABELA 6 apresenta os resultados obtidos com 2 horas de processamento de todos os modelos para o cenário 39, observa-se que exceto o modelo DV124, os outros modelos com combinação de DV obteve GAP melhor que o modelo Original.

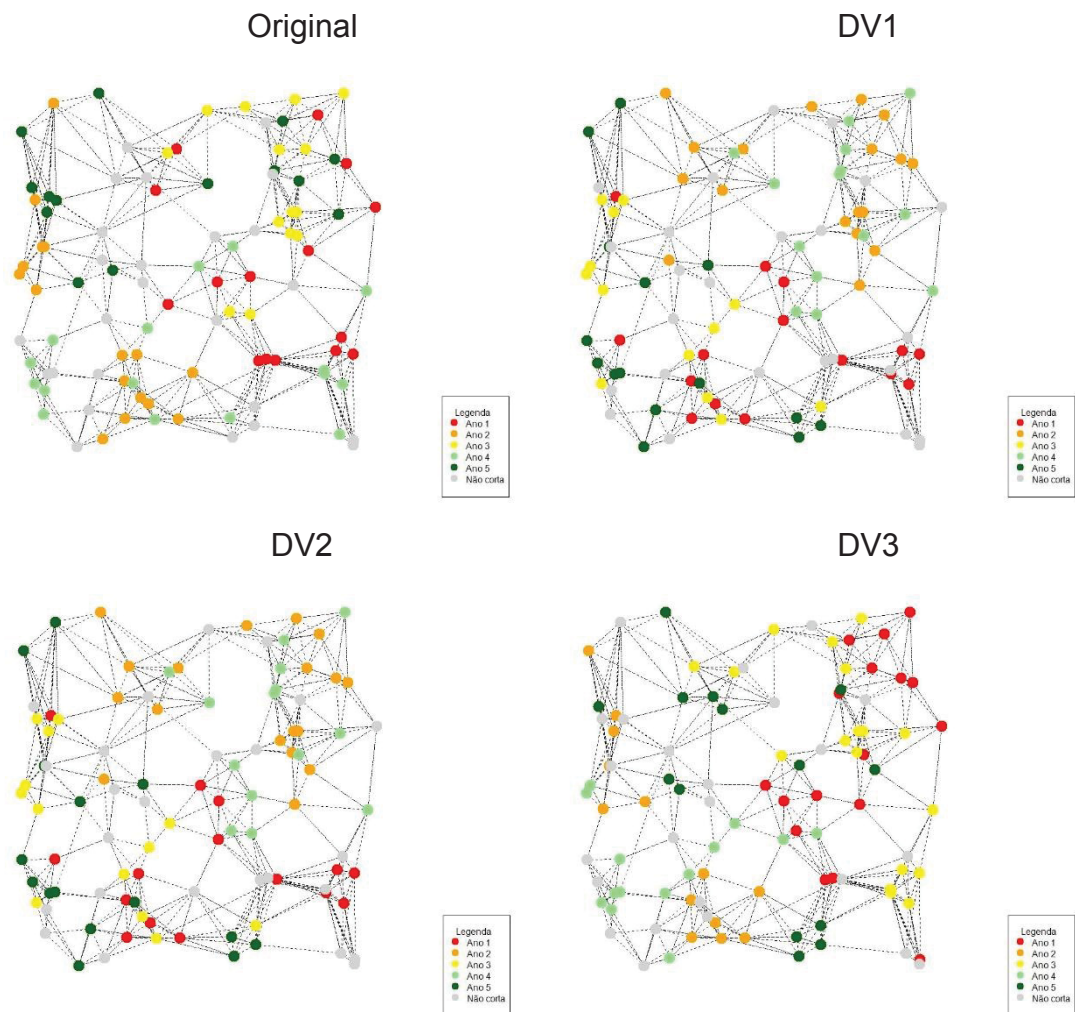
TABELA 6 - RESULTADOS DO CENÁRIO 39 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS

100t5a10.70V2		
N=100; H=5; AM=70 F=At		
	VPL (R\$)	GAP (%)
Original	R\$ 72.206.517,60	1,76
DV1	R\$ 72.302.792,20	1,63
DV2	R\$ 72.728.546,40	1,03
DV3	R\$ 72.366.158,00	1,54
DV4	R\$ 72.221.548,80	1,74
DV12	R\$ 72.728.546,40	1,03
DV13	R\$ 72.386.981,60	1,51
DV14	R\$ 72.315.415,40	1,61
DV24	R\$ 72.728.939,40	1,03
DV34	R\$ 72.638.025,00	1,16
DV124	R\$ 71.868.800,20	2,24
DV134	R\$ 72.649.994,00	1,14

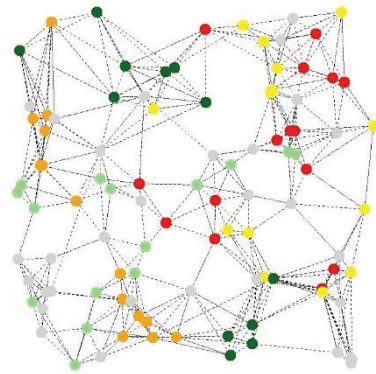
FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 10 se tem a distribuição espacial dentro da floresta para o mesmo cenário. Apesar de o percentual de GAP não sofrer muita alteração, a solução encontrada por cada modelo espacialmente muda. Sobre a agregação de talhões, é possível verificar que de forma geral, há a agregação dos talhões e a formação de blocos. Por conta da geração de cenários gerar grafo conexo e não necessariamente com poucas adjacências entre talhões (que nas imagens são representados pelos tracejados), mesmo existindo a imposição de agregação, visualmente parece que os blocos estão esparsos. Por se tratar de uma floresta Atual, pode ocorrer que não sejam necessárias a colheita de alguns talhões, uma vez que se observou GAP pequenos, mesmo com muitos talhões não sendo selecionados para o agendamento de corte.

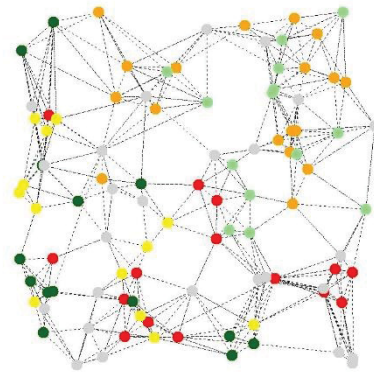
FIGURA 10 - ESPACIALIZAÇÃO DO CENÁRIO 39 EM TODOS OS MODELOS APÓS 2H DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL



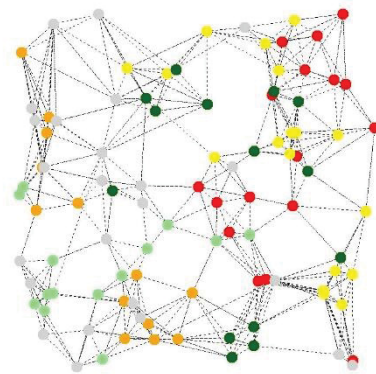
DV4



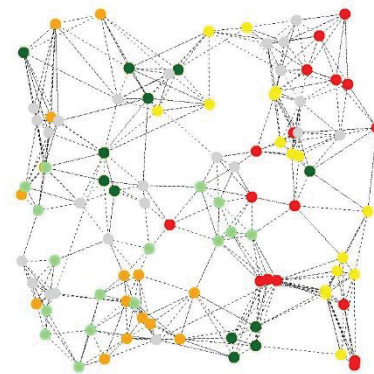
DV12



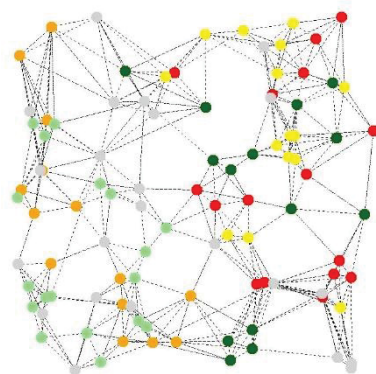
DV13



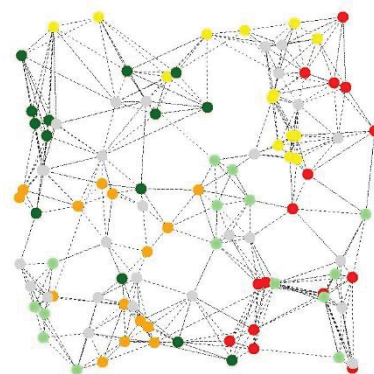
DV14

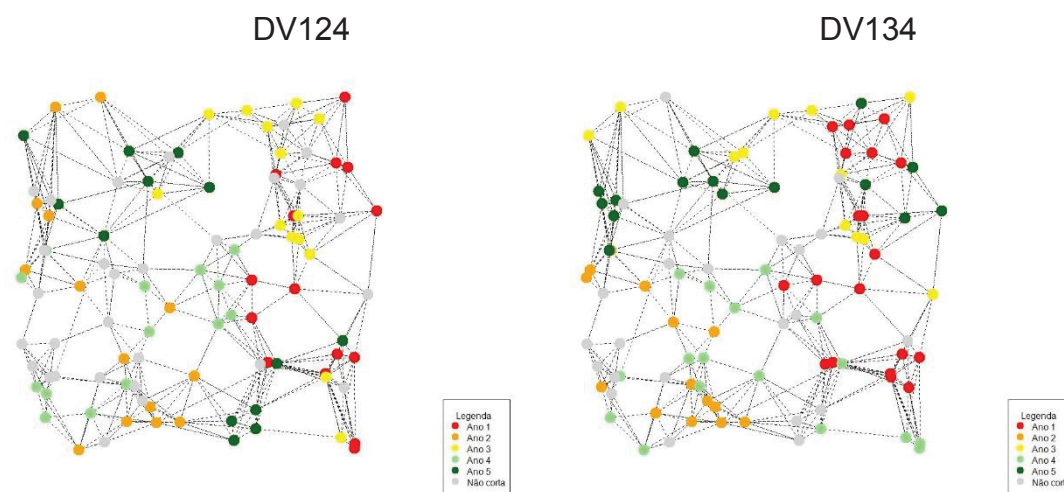


DV24



DV34





FONTE: A autora (2020).

Analizando agora apenas as soluções do modelo Original, nos cenários 34, 36 e 38, em que a variação é na distribuição de idade, a TABELA 7 apresenta o VPL e o GAP obtido a partir do modelo. Notou-se que o VPL da floresta com distribuição aleatória (AI) de idades é superior ao VPL da floresta atual (At), sendo possível a distribuição de idades mais velhas na floresta com distribuição aleatória. Para o modelo Original, os GAP da TABELA 7 são os mais altos dentre os 30 cenários.

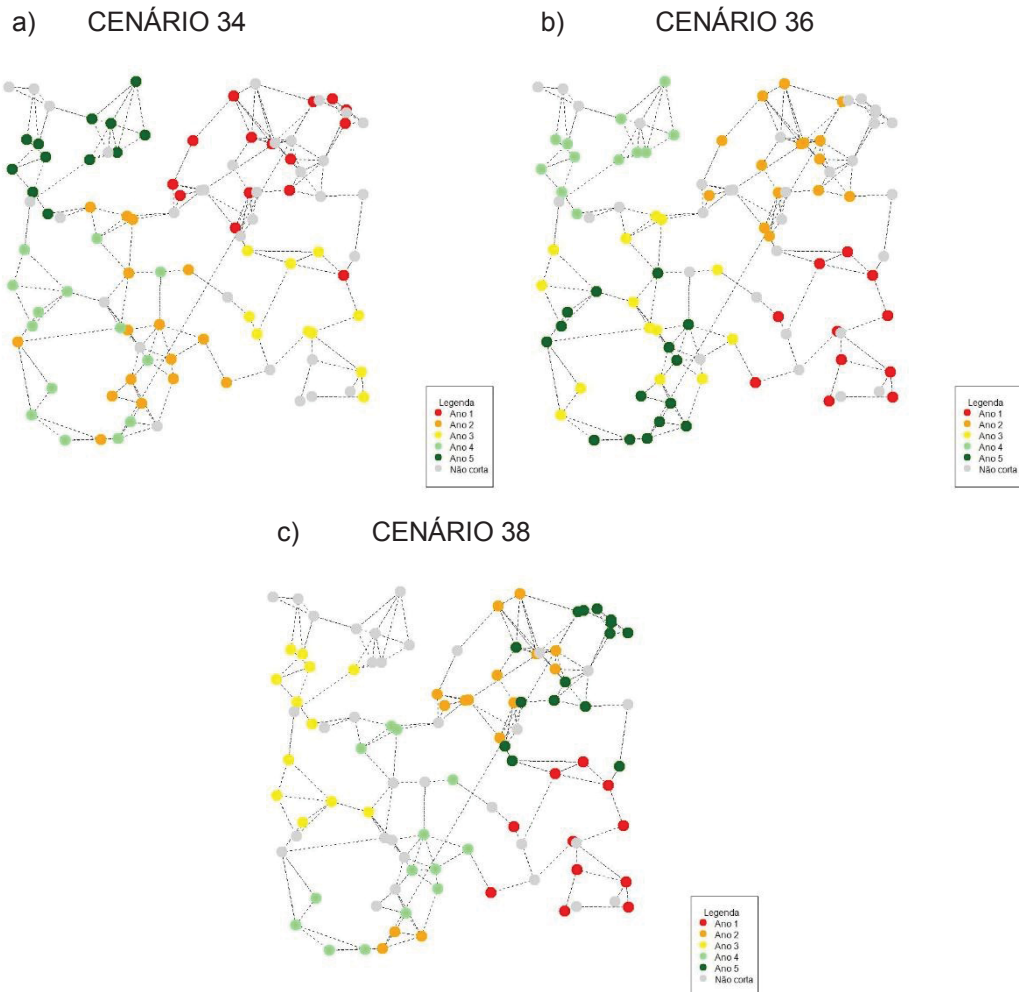
TABELA 7 - VPL E GAP DOS CENÁRIOS 34, 36 E 38.

Cenário	Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	GAP (%)
34	100t5a10.70A1	100	5	70	AI	R\$ 69.078.805,07	7,37
36	100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.395.086,40	11,10
38	100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 67.348.211,80	15,70

FONTE: A autora (2020).

É possível observar a distribuição espacial do agendamento de colheita para esses três cenários na FIGURA 11, a agregação é espacialmente observada nos três cenários, apesar de não ter encontrado soluções ótimas. O cenário que tem mais talhões não selecionados para a colheita ao longo HP é o 38, que possui o maior GAP, indicando que existiria a possibilidade de ter mais talhões agendados para o corte na solução ótima. Outra forma de interpretação seria que, por se tratar de uma floresta atual, em que possui uma expectativa maior de oferta de madeira, não há a necessidade de corte de tantos talhões para atingir o volume da demanda.

FIGURA 11 - ESPACIALIZAÇÃO DOS CENÁRIOS 34, 36 E 38



FONTE: A autora (2020).

Comparando a solução espacial do modelo Original do cenário 39 da FIGURA 10 com a espacialização do cenário 38, FIGURA 11a), apesar de possuírem a mesma quantidade de talhões, visualmente a agregação é mais delimitada, isto porque o número de adjacências é menor para o cenário 38 que no cenário 39, sendo uma justificativa para o GAP do cenário 38 ser maior em relação ao cenário 39.

5.1.3 Considerando restrição de idade mínima

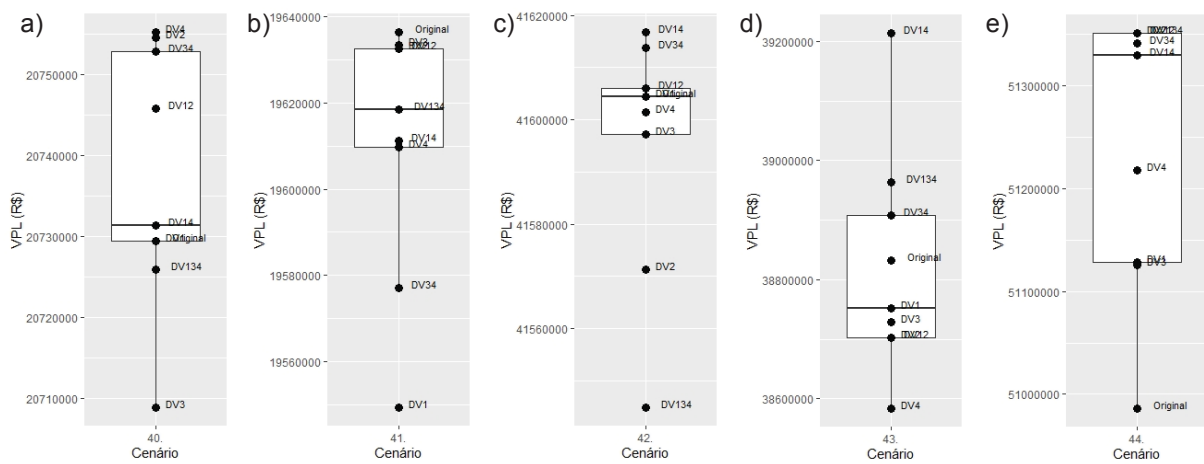
Considerando agora o modelo Original_Id, será analisado o desempenho das combinações das DV. Para isso, será considerado apenas os cenários com 80 ou 100 talhões, 5 anos de HP, área máxima do talhão de 30 ha ou 70 ha. A distribuição de

idade é de floresta atual, para que não ocorra infactibilidade por conta da restrição de idade mínima para o corte.

A tabela com todos os detalhes dos resultados obtidos com todos os modelos é encontrada no APÊNDICE 5. Na tabela do APÊNDICE 6 é apresentado a quantidade de GAP dos modelos com combinações de DV inferiores ao modelo Original_Id e a média percentual de redução. É possível verificar que as quantidades apresentadas na sua maioria é 1 ou 2, que representa menos de 50% da quantidade total, não parecendo atraente o uso de algumas combinações de DV. Apenas os modelos DV14 e DV34 apresentaram uma boa quantidade de GAP inferiores, gerando a média percentual boa. Observando ainda a tabela do APÊNDICE 6, o modelo DV12 e DV134 apesar de ser melhor em apenas dois cenários dos 5 factíveis, quando comparados com o modelo Original_Id, as médias percentuais de GAP são positivas, ou seja, que na média houve redução de GAP. Esta situação se deve ao fato de terem aumentos pequenos, em torno de 5%, de GAP em alguns cenários, e nos cenários com melhor desempenho, uma diminuição em torno de 30% do tempo. Além de ter situações que o GAP é exatamente igual ao obtido no modelo Original_Id. Apesar das quantidade serem baixas na maioria das combinações com DV, apenas no cenário 41 o menor GAP foi do modelo Original_Id.

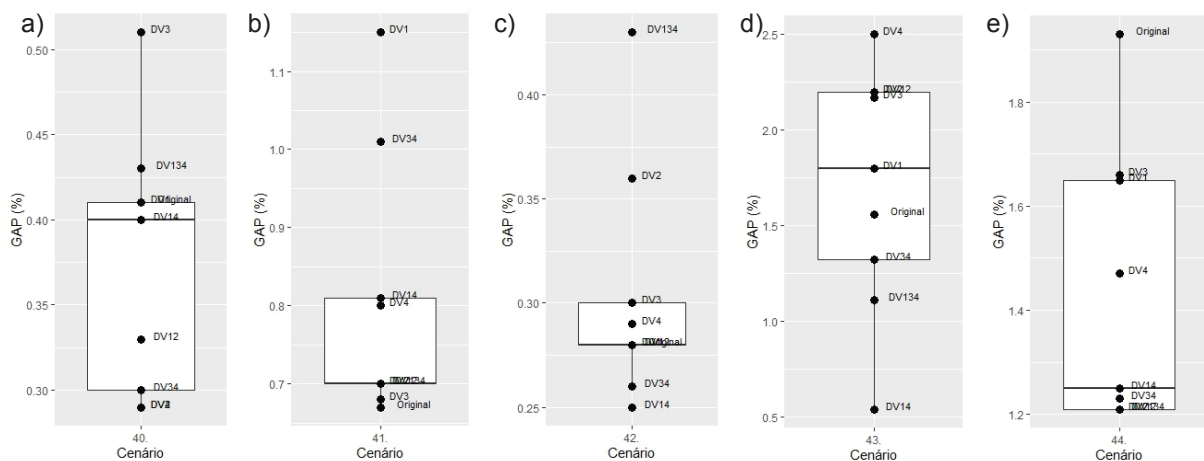
Na FIGURA 12 é possível observar boxplots referente ao VPL encontrado nos testes. As combinações que mais se destacam são as que se encontram na parte superior, como outliers ou como no cenário 44 que representa o terceiro quartil (FIGURA 12e)). Na FIGURA 12b), nota-se que o modelo Original apresentou o melhor resultado em 2h de processamento no cenário 41, ao contrário do cenário 44, que obteve o pior resultado. De forma similar, a FIGURA 13 apresenta os boxplots dos GAP obtidos nos testes, onde os menores valores correspondem a melhores resultados.

FIGURA 12 - BOXPLOT DOS VPL DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 13 - BOXPLOT DOS GAP DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA



FONTE: A autora (2020).

Na TABELA 8 é possível verificar que os GAP obtidos nas combinações das DV foram menores que o GAP do modelo Original_Id para o cenário 44. Talvez seja um indicativo que em cenários com mais talhões as DV são muito promissoras, já que é o cenário com mais talhões testada.

TABELA 8 - RESULTADOS DO CENÁRIO 44 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA PARA CORTE

CENÁRIO 44 -100t5a10.70V1		
N=100; H=5; AM=70; F=At		
	VPL (R\$)	GAP (%)
Original_Id	R\$ 50.986.410,32	1,93
DV1	R\$ 51.128.561,24	1,65
DV2	R\$ 51.350.950,06	1,21
DV3	R\$ 51.125.416,02	1,66
DV4	R\$ 51.218.154,93	1,47
DV12	R\$ 51.350.950,06	1,21
DV13	R\$ 51.345.366,17	1,22
DV14	R\$ 51.329.279,43	1,25
DV24	R\$ 51.218.155,35	1,47
DV34	R\$ 51.341.533,28	1,23
DV124	R\$ 51.248.428,82	1,41
DV134	R\$ 51.350.950,00	1,21

FONTE: A autora (2020).

Observando a restrição (4.14), que na prática é muito utilizada na colheita florestal, foi considerado a idade mínima para corte de 13 anos. A TABELA 9 mostra a distribuição de área de corte ao longo do HP levando em consideração as idades dos talhões do cenário 44, observa-se que existe o respeito pela imposição da idade mínima para o corte, uma vez que, por exemplo, talhões com pinus de 9 anos no primeiro ano do HP é colhido apenas no quinto ano do HP. Além disso, no quarto ano do HP é colhido área com idade de 16 anos no primeiro ano do HP, ou seja, as árvores teriam 19 anos. Mas, apesar disso, boa parte da colheita realizada no quarto ano, são referentes a áreas com árvores mais novas.

TABELA 9 - ÁREA DE CORTE POR ANO DO HP DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DO CENÁRIO 44

Distribuição de idade - Cenário 44									
Ano de colheita	9	10	11	12	13	14	15	16	Total de área por ano
1					86	117	47	156	406
2				33	169	31	121	49	403
3			163		23	240			426
4		265			20	40		102	427
5	113		240	78					431
Total de área por distribuição de idade	113	265	403	111	298	428	168	307	2093

FONTE: A autora (2020).

Agora analisando apenas o modelo *Original_Id*, comparando os resultados obtidos pelo modelo *Original* nos cenários 26, 27, 32, 33 e 38, verifica-se que o VPL obtido é inferior, uma vez que quando imposta mais uma restrição, menor será o resultado obtido na função objetivo, como observado na TABELA 10. É possível notar também que durante duas horas de processamento, os GAP obtidos pelo modelo com restrição de idade mínima são na sua maioria menores que os GAP do modelo *Original*. Isto acontece porque a restrição (4.14) diminui o espaço de busca, uma vez que ao analisar um determinado ano do HP, todos os talhões que possuem idade inferior a idade mínima imposta não serão designados para o corte, impondo de imediato que a variável x_{ijb} seja fixa.

TABELA 10 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS ENTRE O MODELO ORIGINAL E ORIGINAL_ID EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO

Nome	Original						Original_Id	
	N	H	AM	F	VPL (R\$)	GAP (%)	VPL (R\$)	GAP (%)
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.581.262,81	2,24	R\$ 20.729.456,80	0,41
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.626.035,60	0,80	R\$ 19.636.352,00	0,67
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.961.210,53	2,57	R\$ 41.604.399,80	0,28
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.793.538,40	1,39	R\$ 38.832.187,00	1,56
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 67.348.211,80	15,70	R\$ 50.986.410,32	1,93

FONTE: A autora (2020).

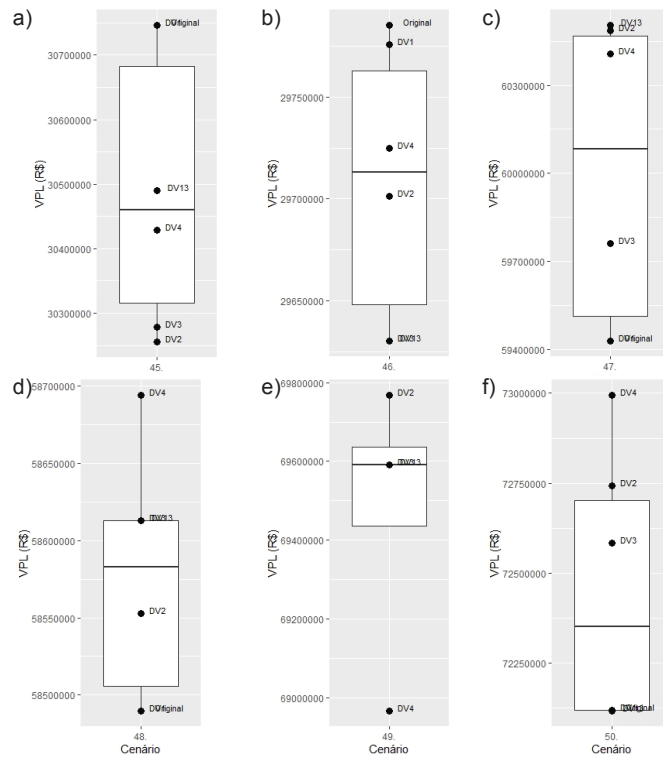
5.1.4 Considerando a imposição de talhões para corte no primeiro ano do HP

Para considerar a restrição (4.15), ou seja, o modelo Original_R, levou-se em conta as mesmas condições das florestas da seção anterior, para evitar infactibilidades. Os talhões que foram impostos para a colheita foram escolhidos considerando o primeiro talhão criado pelo gerador de cenários e mais 3 talhões adjacentes a este talhão. Não poderia considerar todos os talhões adjacentes, pois poderia causar infactibilidade, uma vez que poderia não atender a restrição de área máxima ou de controle de volume produzido. Dos 6 cenários, o modelo Original_R não conseguiu provar nenhuma situação, se a solução era viável ou não, em um dos cenários. Os detalhes podem ser vistos na tabela do APÊNDICE 7.

Na tabela que está no APÊNDICE 8, a média percentual de redução do GAP foi calculado baseado nos 5 cenários, uma vez que não havia GAP no modelo Original_R, mas a quantidade de GAP inferiores considera os 6 cenários, uma vez que algumas combinações de DV obteve soluções viáveis. O modelo DV1, não teve GAP melhor que o modelo Original_R, pois em 4 cenários conseguiu o mesmo percentual de GAP, no cenário sem resposta do modelo Original_R também não conseguiu atingir alguma resposta e em apenas um cenário obteve um GAP superior ao modelo Original_R.

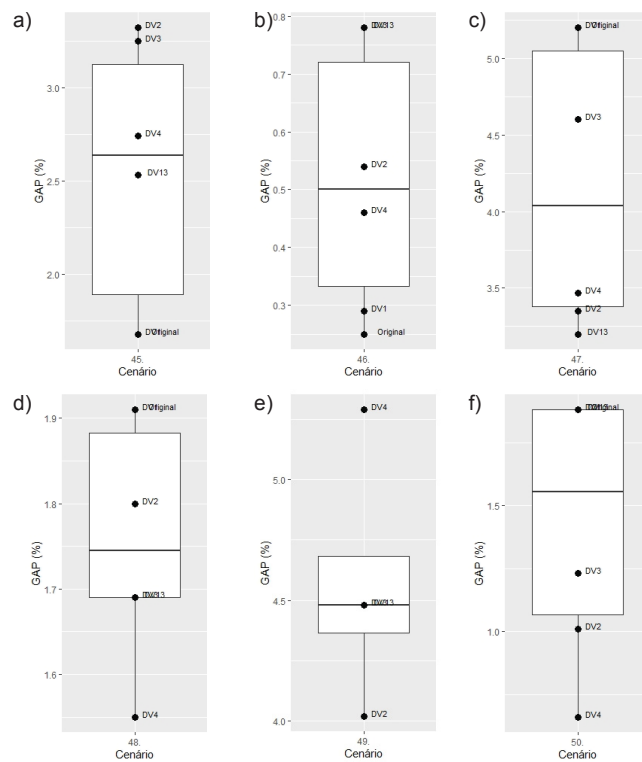
Observando a FIGURA 14, vendo os melhores resultados, ou seja, os que estão na parte superior, uma vez que está lidando com VPL, não existe uma combinação que se destaca em todos os cenários. De forma similar é a interpretação da FIGURA 15 ocorre, considerando agora os valores mais inferiores, uma vez que quanto menor o GAP, representa que a solução atual está mais próximo da solução ótima. Atentando as 15a), 15c), 15d) e 15f), o GAP encontrado para 2h de processamento do modelo Original_R foi equivalente ao DV1, afirmando o que foi citado acima. Tanto a FIGURA 14e), como a FIGURA 15e) não apresentam o resultado do modelo Original_R para o cenário 49, pois não teve solução, sendo detalhado mais a diante.

FIGURA 14 - BOXPLOT DOS VPL DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IMPOSIÇÃO DE TALHÕES PARA O CORTE NO PRIMEIRO ANO DO HP



FONTE: A autora (2020).

FIGURA 15 - BOXPLOT DOS GAP DOS CENÁRIOS COM RESTRIÇÃO DE IMPOSIÇÃO DE CORTE PARA O PRIMEIRO ANO DO HP



FONTE: A autora (2020).

Em dois modelos, DV3 e DV13, as médias percentuais apresentadas na tabela apresentado no APÊNDICE 8 representam que houve um aumento médio de mais de 40% nos dois casos. Isto porque teve cenários similares com o cenário 46, que algumas combinações de DV obteve mais de 100% de aumento no GAP em relação ao GAP do modelo Original_R, como mostrado na TABELA 11. Apesar de ser uma diferença grande, o GAP em todas os casos é abaixo de 1%, assim analisando o VPL, a diferença é um pouco mais de R\$ 100.000,00, como observado no modelo DV3 e DV13.

TABELA 11 - RESULTADOS DO CENÁRIO 46 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO (4.15)

	Cenário 46	
	N=80; H=5; AM=30; F=At	
	VPL (R\$)	GAP (%)
Original_R	R\$ 29.785.110,40	0,25
DV1	R\$ 29.775.526,80	0,29
DV2	R\$ 29.701.149,20	0,54
DV3	R\$ 29.630.486,20	0,78
DV4	R\$ 29.724.869,60	0,46
DV12	R\$ 29.761.496,60	0,34
DV13	R\$ 29.630.486,20	0,78
DV14	R\$ 29.778.368,60	0,28
DV24	R\$ 29.762.147,20	0,33
DV34	R\$ 29.716.661,60	0,48
DV124	R\$ 29.705.741,20	0,52
DV134	R\$ 29.756.049,60	0,35

FONTE: A autora (2020).

Já no cenário 49, a qual o modelo Original_R não obteve resposta em 2 horas de processamento, ou seja, não se pode concluir que o modelo é viável ou não para este cenário, por consequência, não foi gerado nenhum GAP. algumas combinações de DV conseguiram encontrar uma solução factível no mesmo período de processamento, como observado na TABELA 12.

TABELA 12 - RESULTADOS DO CENÁRIO 49 EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO EM TODOS OS MODELOS CONSIDERANDO A RESTRIÇÃO (4.15)

	Cenário 49	
	N=100; H=5; AM=70; F=At	
	VPL (R\$)	GAP (%)
Original_R	-*	-
DV1	-	-
DV2	R\$ 69.767.669,80	4,02
DV3	R\$ 69.591.355,20	4,48
DV4	R\$ 68.966.668,75	5,29
DV12	R\$ 69.704.995,14	4,12
DV13	R\$ 69.591.355,20	4,48
DV14	R\$ 68.680.808,40	5,65
DV24	R\$ 68.405.926,60	6,06
DV34	R\$ 68.896.140,00	5,63
DV124	R\$ 68.535.011,48	5,51
DV134	-	-

FONTE: A autora (2020).

NOTA: * tracejado (-) simboliza que não houve uma resposta, não se garantiu nem a viabilidade, nem a inviabilidade.

5.2 CENÁRIOS DA LITERATURA

Apesar de não citadas até o presente momento, durante os testes do potencial do modelo desenvolvido, observou-se que o modelo considera infactível uma floresta com representação de grafo não conexo, acredita-se que se deve ao fato de existir restrições considerando a quantidade de arcos gerada pelo algoritmo Floyd-Warshall. Por conta disso foram selecionados 3 cenários da literatura para analisar o potencial do modelo assim como das combinações de DV.

Nos cenários a área está na unidade de comprimento acre (1 acre \cong 0,405 hectare), usual no exterior. Foi necessário aplicar o algoritmo Floyd-Warshall para ter o parâmetro de distância entre dois talhões, o que em nenhum dos cenários foi fornecido. Estes cenários estão presentes no artigo de Tóth, McDill e Geoerge (2013), possuem os nomes Five Points, Kittaning4 e PhyllisLeeper. Ao considerar os parâmetros que não estão nos cenários, como a distância máxima em arcos para a agregação de talhões, o primeiro cenário citado gerou um problema infactível, logo será analisado os demais.

O modelo escolhido foi o Original, uma vez que estes cenários reais são de Washington, e possuem espécies diferentes do Pinus com idades apropriadas para cortes diferentes, pois se deve considerar o clima e o solo do local, que interferem diretamente no crescimento das árvores. O tempo limite de processamento foi de 2 horas (7.200 segundos), no cenário Kittaning4 os modelos encontraram a solução ótima, já no cenário PhyllisLeeper a comparação será feita a partir do GAP, uma vez que os modelos atingiram o tempo limite e não foi encontrado a solução ótima.

Conforme observado na TABELA 13, os modelos DV3 e DV134 obtiveram uma demora de mais de 100% em relação ao tempo do modelo Original. O modelo DV14 conseguiu uma redução de mais de 60% no tempo de processamento.

TABELA 13 - RESULTADOS PARA O CENÁRIO KITTANING4 APRESENTANDO O TEMPO E O PERCENTUAL DE REDUÇÃO

Kittaning4			
	VPL (R\$)	Tempo (s)	Percentual de redução de tempo (%)
Original	R\$ 1.492.039,40	2.271,30	
DV1	R\$ 1.492.039,40	2.059,27	9,34
DV2	R\$ 1.492.039,40	3.291,14	-44,90
DV3	R\$ 1.492.039,40	4.880,90	-114,89
DV4	R\$ 1.492.039,40	2.332,45	-2,69
DV12	R\$ 1.492.039,40	3.598,31	-58,43
DV13	R\$ 1.492.039,40	2.762,75	-21,64
DV14	R\$ 1.492.039,40	889,90	60,82
DV24	R\$ 1.492.039,40	2.454,50	-8,07
DV34	R\$ 1.492.039,40	3.584,74	-57,83
DV124	R\$ 1.492.039,40	2.180,67	3,99
DV134	R\$ 1.492.039,40	4.954,73	-118,15

FONTE: A autora (2020).

Já no cenário PhyllisLeeper os GAP encontrados em todos os modelos são baixos, como observado na TABELA 14. Todos os modelos com combinações com DV obteve um percentual de redução do GAP em relação ao modelo Original. Em 4 modelos com combinações de DV possuem uma redução de GAP acima de 50%, apesar do GAP do modelo Original ser inferior a 1%.

TABELA 14 - RESULTADOS PARA O CENÁRIO PHYLLISLEEPER APRESENTANDO O TEMPO E O PERCENTUAL DE REDUÇÃO

	PhyllisLeeper		
	VPL (R\$)	GAP (%)	Percentual de redução de GAP (%)
Original	R\$ 5.644.529,83	0,75	
DV1	R\$ 5.644.529,83	0,75	0,00
DV2	R\$ 5.661.354,73	0,45	40,00
DV3	R\$ 5.669.441,57	0,31	58,67
DV4	R\$ 5.659.407,35	0,49	34,67
DV12	R\$ 5.648.384,73	0,69	8,00
DV13	R\$ 5.669.441,57	0,31	58,67
DV14	R\$ 5.656.855,72	0,54	28,00
DV24	R\$ 5.666.286,54	0,37	50,67
DV34	R\$ 5.646.989,76	0,71	5,33
DV124	R\$ 5.650.553,82	0,65	13,33
DV134	R\$ 5.668.445,17	0,33	56,00

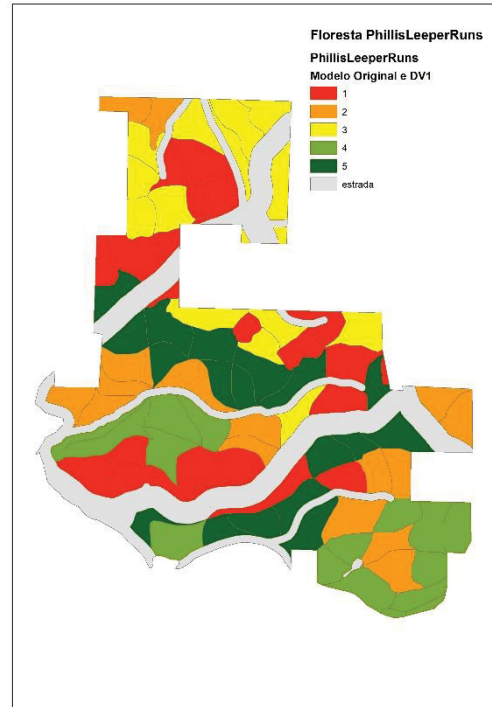
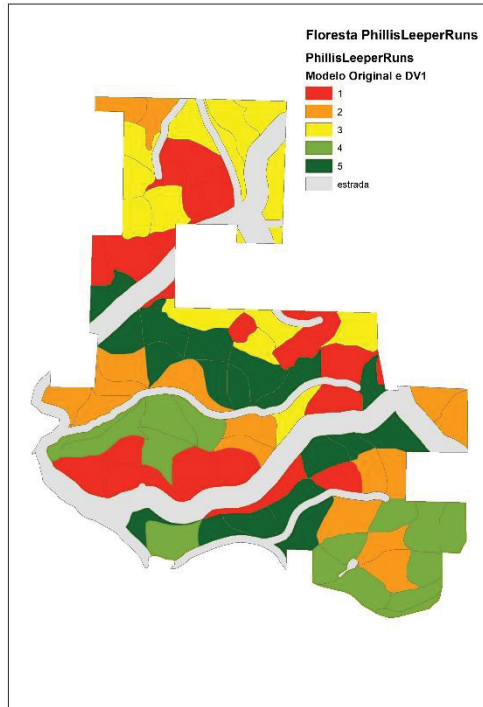
FONTE: A autora (2020).

Na FIGURA 16, é possível verificar a espacialização do agendamento de colheita ao longo de 5 anos de HP do cenário PhyllisLepper, quando o tempo limite de processamento é de 2 horas. No modelo DV2 existe um talhão que não é selecionado para nenhum ano do HP para o corte, foi a única situação, todos os outros modelos apresentam a colheita de todos os talhões. O modelo Original e o modelo DV1 possuem a mesma espacialização já que possuem a mesma solução. Por utilizar o recurso SIG, é possível observar com mais clareza a agregação de talhões que o modelo proposto atende. Também a formação de blocos atendendo a restrição de área máxima, assim como a aproximação de talhões de anos consecutivos.

FIGURA 16 - ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM 2 HORAS DE PROCESSAMENTO PARA O CENÁRIO PHYLLISLEPPER

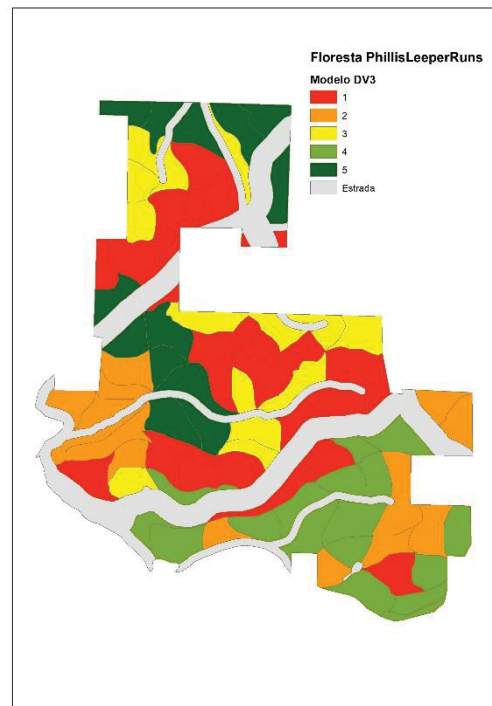
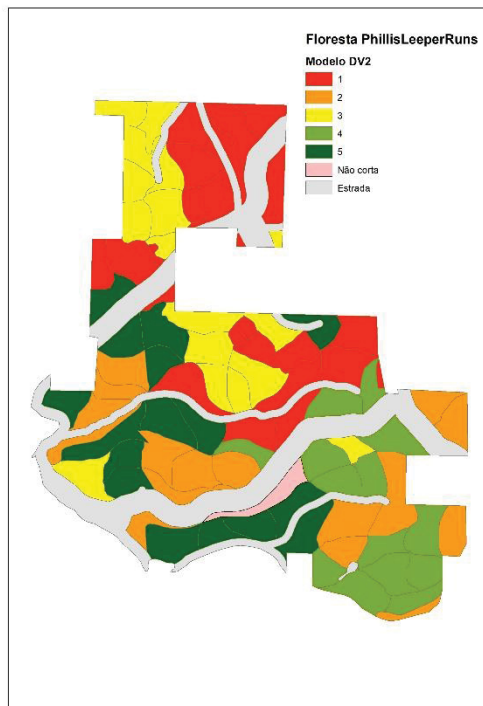
Original

DV1

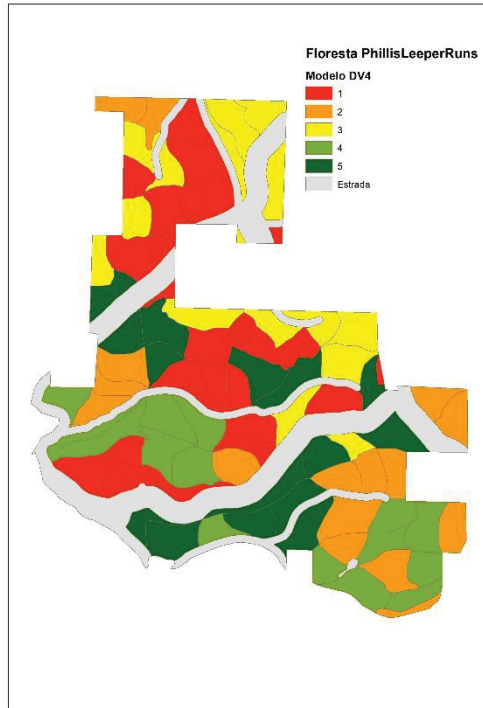


DV2

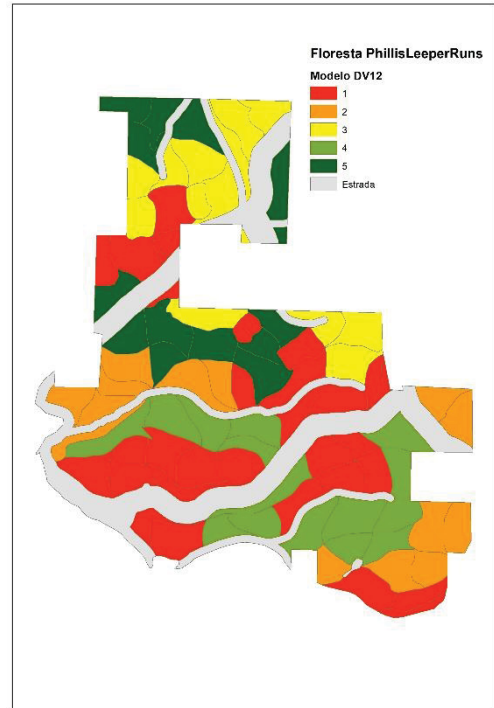
DV3



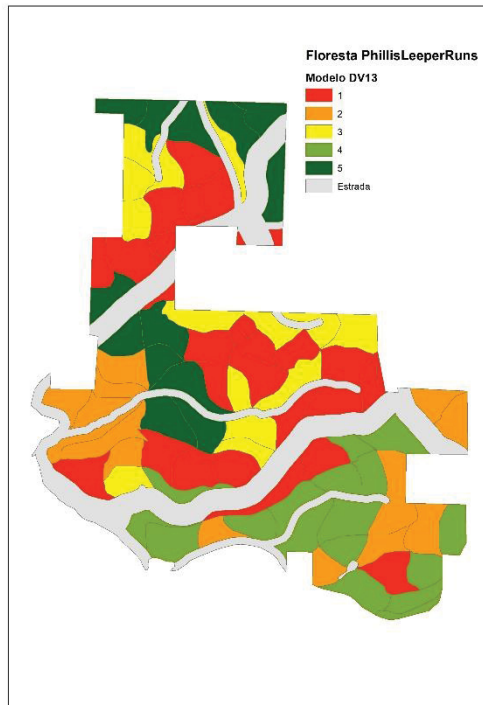
DV4



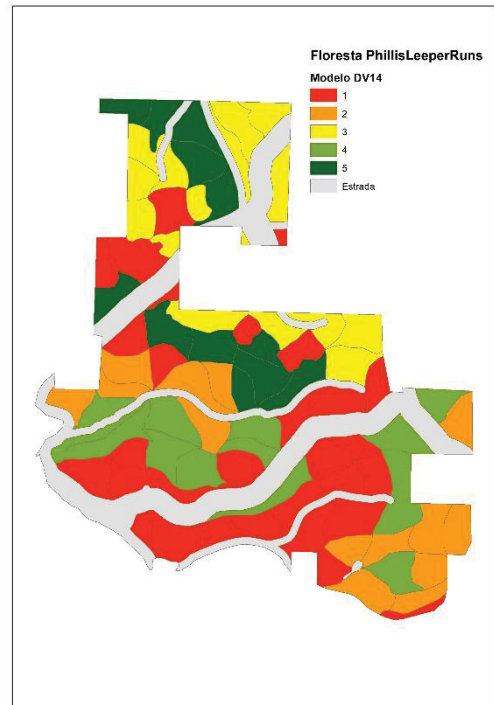
DV12



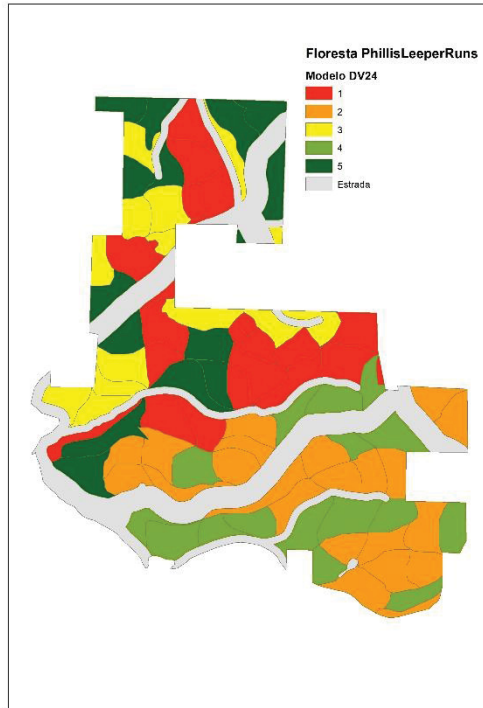
DV13



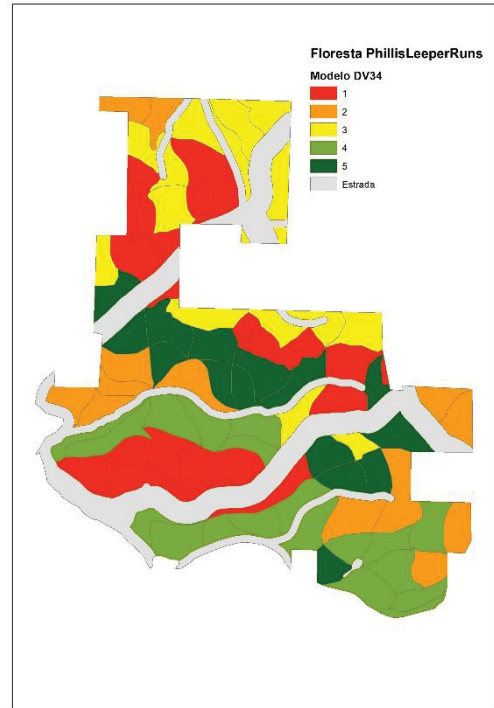
DV14



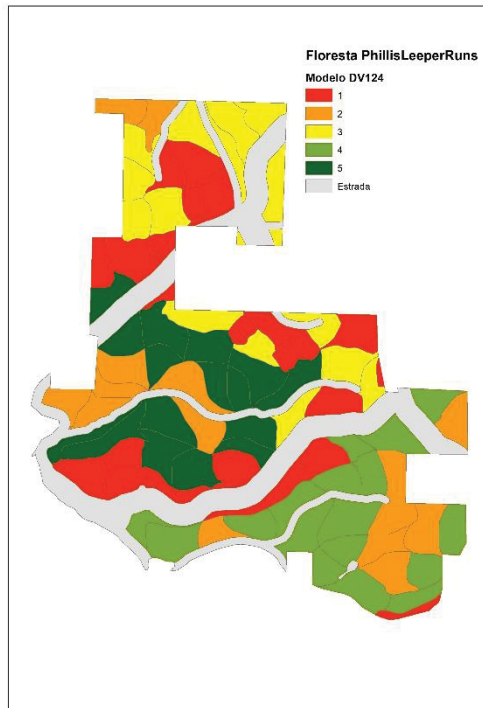
DV24



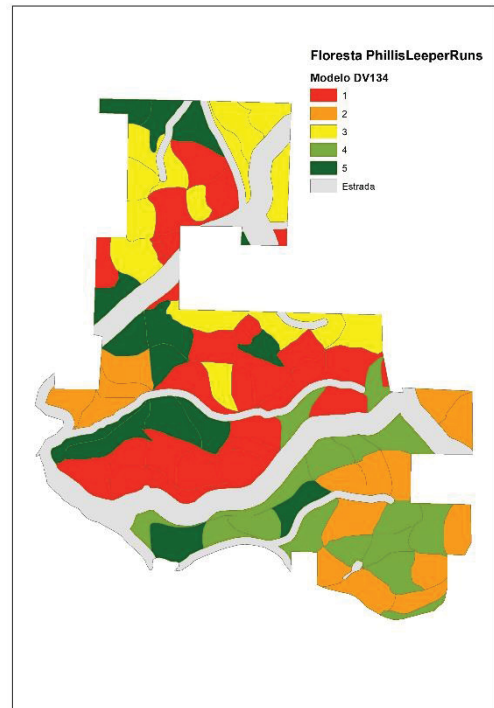
DV34



DV124



DV134



FONTE: A autora (2020).

Observando a FIGURA 16, a espacialização do modelo DV24, apresenta o agrupamento de talhões do ano 3 e 4 em torno de uma estrada, tendo talhões agendados para cada ano nos dois lados da estrada. Não se vê problema algum nisso, uma vez que existe a adjacência entre talhões por meio da estrada. Porém, numa situação hipotética, se a representação de estrada fosse na verdade um rio, não seria conveniente um agendamento de corte com essa distribuição, uma vez que é impossível a travessia do rio sem a existência de uma ponte. Nesse caso, os talhões devem ser considerações não adjacentes.

5.3 DISCUSSÃO FINAL

O modelo apresentado neste trabalho para o problema de agendamento florestal possui muitas complexidades, deve-se levar em conta a quantidade de sortimentos, aspectos da floresta quanto a distribuição de idade, além das restrições formuladas matematicamente. A maioria dos cenários considerados foram gerados, apesar de ter fundamento, foram gerados de forma aleatória, podendo ou não causar mais complexidade. Neste aspecto, a distribuição de idade aleatória torna o problema mais difícil, uma vez que se quer agregar os talhões, mas pode haver talhões adjacentes com uma diferença de idades muito grandes. Lembrando que a maioria dos trabalhos correlatos apresentou resultados para florestas reais (REMPEL; KAUFMANN, 2003; SILVA, 2015; KAŠPAR et al., 2016; STANG, 2016), e essa condição poderia beneficiar para melhor análise do modelo. Por conta disso, foi se necessário a criação de três tipos de florestas: atual, futura e aleatória, para validar o modelo de várias formas possíveis.

Apesar disso, o modelo Original mostrou-se promissor, pois em poucos casos ocorreu a infactibilidade apesar de todas as adversidades citadas acima. Além disso a espacialização resultante do modelo atende as questões pertinentes quanto a área máxima e ao mesmo tempo a agregação dos talhões a fim de respeitar aspectos ambientais e potencializar os aspectos econômicos. Conforme Gustafson e Crow (1994), a agregação não é benéfico apenas no aspecto econômico, também é no aspecto ambiental, uma vez que a colheita de blocos de talhões que estão longes no mesmo período, ao ser necessário o deslocamento de maquinários e pessoal, provoca perturbação ambiental, o que é prejudicial à floresta.

Analisando a situação em que se considera o modelo Original_Id, a restrição de idade mínima para o corte pode causar infactibilidade conforme a distribuição das idades na floresta, pois junto com as restrições formuladas, pode não ocorrer uma solução viável. Porém, quando existe solução, a convergência, de modo geral, é mais rápida que o modelo Original, isto porque, para cada período do HP, se o talhão não possui a idade mínima, a variável x_{ijb} já se torna zero. O modelo Original_R, é bem interessante para quando os módulos de corte já estão localizados próximos de determinados talhões. Ao testar em cenários hipotéticos, é possível observar que houve resultados, sendo promissor para uma situação específica.

De modo geral, é possível verificar que os modelos, apesar de lidar com várias situações combinatórias, conseguiu resolver a maioria dos cenários, chegando em soluções ótimas ou em GAP considerados baixos. Até mesmo com cenários com 30 ou 40 talhões, que seria considerado um grafo muito pequeno, e com todas as condições impostas, poderia facilmente, todos os cenários serem infactíveis. O motivo para isto é que a restrição (4.4) flexibiliza para que não seja necessário a colheita de todos os talhões da floresta, sendo possível que alguns talhões não sejam selecionado para o agendamento de corte ao longo do HP. O interessante seria aplicar numa situação real, numa floresta que seja extensa para verificar o potencial deste modelo. Apesar de ser para um problema de nível tático, o modelo por agregar os talhões e aproximar os blocos de mesmo período, já auxilia no planejamento operacional, uma vez que o deslocamento será o menor possível.

Observando as DV, apesar de não haver uma conclusão impactante que as DV diminuam consideravelmente o tempo computacional como era esperado, é possível verificar que as DV apresentam melhorias em alguns cenários, tendo sempre uma ou duas combinações de DV que mais se destacam em cada grupo de cenários. Existiu o caso de um cenário em que o GAP obtido no modelo Original foi melhor que de todas as combinações de DV, ao mesmo tempo em que houve a situação em que o modelo Original_R não encontrou solução, mas as combinações de DV encontrou soluções factíveis para o mesmo período de processamento. No geral, as DV são boas ferramentas, ainda mais se tratando de um modelo com variáveis binárias, para redução de tempo ou melhor solução. Possivelmente, são mais promissoras em cenários com mais talhões.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresenta uma proposta de modelo PLIM para o agendamento de colheita florestal que atende aspectos ambientais e econômicos do setor florestal. Existe toda atenção em cima do problema de agendamento de colheita, uma vez que é considerado a área de alto custo para as empresas. Dentro do problema, é importante analisar os impactos da colheita na qualidade do solo, na diminuição da fauna, na degradação da beleza cênica e na diminuição de fluxo do rio. Estes aspectos podem causar o aumento do custo operacional, por outro lado, a empresa florestal sempre objetiva a maximização do lucro, logo, os aspectos ambientais e econômicos são conflitantes. Além disso, a parte espacial da floresta, ao considerar a adjacência entre talhões, torna o problema de agendamento de colheita florestal desafiador.

Ao observar que o modelo impõe a área máxima e ao mesmo tempo a agregação de talhões, fica comprovado, principalmente com a parte visual da espacialização, que o modelo atende estes aspectos. Além disso, nos cenários gerados, se considerou dois tipos de sortimentos, celulose e serraria e o modelo teve que avaliar o valor da variável de decisão de colheita no determinado período, analisando a produção ideal para atender a demanda imposta de cada sortimento.

A restrição de idade mínima para corte apresentou-se como promissor para a diminuição do tempo de processamento, uma vez que impõe que talhões que estão com idade inferior a idade mínima num determinado período não seja colhido, independentemente de qualquer outra restrição. Porém, foi observado que em algumas situações pode causar infactibilidade, por exemplo, se a distribuição de idades fosse de uma floresta futura, em que existem mais árvores com idades menores que a idade ideal de corte.

Analisando o aspecto econômico, a restrição de imposição de talhões para o corte no primeiro período do HP permite que exista um deslocamento pequeno do módulo de colheita em relação a rotação anterior, já que na prática, obrigaria que o módulo de colheita a ir nos talhões mais próximos.

O modelo em suas variações, com o limite de tempo de 2 horas, conseguiu atingir um GAP bom na maioria dos cenários, sendo um potencial de modelo para o problema de agendamento tático de colheita florestal. Apesar da sua capacidade, o modelo não foi testado em florestas com representação de grafo com muitos nós para

verificar e se for o caso, aprimorar o modelo. O ideal seria a aplicação deste modelo para uma situação real.

Apesar do modelo apresentar uma potencial aplicação num caso real, é necessário salientar a fragilidade do modelo, uma vez que para florestas que tem a representação por meio de um grafo não conexo, o modelo não encontra solução. Um caso prático dessa situação é a existência de um rio entre dois talhões, isto implica que não existe adjacência entre eles e não possibilita calcular pelo algoritmo Floyd-Warshall o número mínimo de arcos para conectar estes dois talhões.

Também é necessário ressaltar que com o modelo proposto se pode controlar a quantidade máxima de blocos que podem ser criadas, não sendo encontrado nada similar na literatura. Este controle pode ajudar a gestão a ter mais precisão nas tomadas de decisões.

Por conta da escassez de instâncias na literatura, foi necessário a criação de cenários. Quanto a isso, é possível ver que todo o processo para a criação teve o cuidado para que a floresta não fosse uma situação infactível. Assim como a demanda de cada ano do HP e a área mínima e máxima para o corte, que tiveram processos para que os valores obtidos fossem difíceis de tornar o problema infactível, prejudicando assim os estudos. Quanto a melhoria, observa-se que possivelmente o controle no número de adjacências tornaria mais fácil a visualização da solução do modelo.

Quanto as DV, considerando a definição apresentada por Pochet e Wolsey (2006), o objetivo é encontrar uma nova restrição que diminua a área de busca sem descartar a solução ótima. Ao rodar as combinações de DV e obtiveram a solução ótima, verificou-se que os modelos com as combinações obtiveram a mesma solução. Sendo assim, não existiu a exclusão da solução ótima do problema. Porém deveria existir uma redução no tempo computacional ou conseguir a solução no mesmo tempo de processamento, uma vez que a área de busca iria diminuir com a DV ou manter-se igual.

Apesar disso, no total dos testes, as desigualdades apresentaram um bom desempenho, tendo cenáriosss que o modelo com combinação de DV se mostrou mais rápido que o modelo principal. Então conclui-se que as DV (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20) são desigualdades válidas. Considerando agora as combinações ou o uso individual das DV, o modelo DV1 apresentou um dos melhores desempenhos. As

combinações com 3 DV, os modelos DV124 e DV134 foram os que menos diminuíram o tempo computacional, comparado ao modelo principal.

O trabalho contribui para os futuros trabalhos, motivando as seguintes pesquisas: *i)* validar o fato da busca por agregação de talhões pode causar a minimização de custos de manutenção e criação de estradas, com os dados de uma floresta real; *ii)* validar a adaptação do modelo proposto para a situação em que se considera o *green-up*, tornando o modelo flexível a regulamentos de vários países; *iii)* generalizar o algoritmo de criação de florestas para mais de uma espécie e com mais sortimentos e deixar acessível para a comunidade acadêmica em forma de aplicativo ou algo similar, considerando a escassez de instâncias e *iv)* analisar se realmente é possível situações com DV em que ao otimizar, o tempo de processamento do modelo com DV seja superior ao tempo do modelo principal.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, M. Scope , Opportunity and Challenges in Operations Research. **IOSR Journal of Mathematic**, v. 13, n. 4, p. 27–32, 2017.
- ARENALES, M. et al. **PESQUISA OPERACIONAL**. 6. ed. Rio de Janeiro: Elsever, 2007.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. **Planejamento florestal otimizado considerando áreas mínimas e máximas operacionais de colheita**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2014.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **CERNE**, v. 21, n. 4, p. 649–656, 2015.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D. et al. Promoting harvesting stands connectivity and its economic implications in Brazilian forest plantations applying integer linear programming and simulated annealing. **Forest Policy and Economics**, v. 73, p. 120–129, 2016.
- BACHMATIUK, J.; GARCIA-GONZALO, J.; BORGES, J. G. Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. **Silva Fennica**, v. 49, n. 4, p. 1–18, 2015.
- BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2009.
- BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modelling**, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.
- BATISTA, G. V. **PROPOSTA DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO EM ARCOS CAPACITADO E PERIÓDICO**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2014.
- BORGES, P. et al. Effects of site productivity on forest harvest scheduling subject to green-up and maximum area restrictions. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 5, p. 507–516, 2016.
- BURIOL, L.; RITT, M.; COSTA, A. M. **Otimização combinatória** Porto Alegre Universidade Federal do Rio Grande do Sul, , 2018.
- CAGLAYAN, I. et al. Spatial harvest scheduling for oak coppices conversion into high forest involving wood production management. **Bosque (Valdivia)**, v. 39, n. 2, p. 177–190, 2018.
- CARO, F. et al. A 2-Opt Tabu Search Procedure for the Multiperiod Forest Harvesting Problem and Even Flow Constraints. **Forest Science**, v. 49, n. 5, p. 738–751, 2003.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I. Branch-and-cut for the forest harvest scheduling subject to clearcut and core area constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 265, n. 2, p. 723–734, 2018.

CONSTANTINO, M.; MARTINS, I.; BORGES, J. G. A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions A New Mixed-Integer Programming Model for Harvest Scheduling Subject to Maximum Area Restrictions. **Operations Research**, v. 56, n. 3, p. 542–551, 2008.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T. Problema de agendamento de colheita florestal : comparação entre dois modelos matemáticos considerando aspectos ambientais e econômicos. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, p. 1–13, 2019.

DEMANTOVA, B. E.; SCARPIN, C. T. **Modelagem exata para o problema de roteamento de estoque com janelas de tempo An exact model for the inventory routing problem with time windows**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. **Anais...**Ponta Grossa: 2018

DONG, L. et al. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: A case study of the simulated annealing algorithm. **Forest Ecology and Management**, v. 356, n. 15, p. 124–135, 2015.

EGGERS, J. et al. Balancing landscape-level forest management between recreation and wood production. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 33, p. 1–11, 2018.

EMBRAPA. **SisPinus**, 1995. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/software/>>

FERRARI, L. S.; ARCE, J. E.; LIBANIO, A. Agendamento tático otimizado da colheita florestal em povoamentos de Pinus spp. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 167–176, 2019.

FIORENTIN, L. D. **Estratégias de regulação de povoamentos de Pinus elliottii e Pinus taeda utilizando programação linear**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2016.

FLOYD, R. W. Algorithm 97: Shortest Path. **Communications of the ACM** 9, p. 345, 1962.

FONSECA, T. F.; CERVEIRA, A.; MOTA, A. An integer programming model for a forest harvest problem in Pinus pinaster stands. **Forest Systems**, v. 21, n. 2, p. 272–283, 2012.

FSC BRASIL. **Avaliação de Plantações Florestais na República Federativa do Brasil: Padrão Harmonizado entre as Certificadoras**São PauloFSC Brasil, , 2014.

FUPEF. Dicionário de termos florestais. p. 102, 2018.

FUSCO, J. P. A.; SACOMANO, J. B. **Operações E Gestão Estratégica Da Produção**. São Paulo: Arte & Ciência, 2007.

GHONIEM, A.; FLAMAND, T.; HAOUARI, M. Exact Solution Methods for a Generalized Assignment Problem with Location / Allocation Considerations Exact Solution Methods for a Generalized Assignment Problem with Location / Allocation Considerations. **Journal on Computing**, v. 28, n. 3, p. 589–602, 2016.

GOMORY, R. E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. **Bulletin of the American Mathematical Society**, v. 64, p. 275–278, 1958.

GOYCOOLEA, M. et al. Harvest to Maximum Area Scheduling Subject Exact Approaches Restrictions : Exploring. **Operations Research**, v. 53, n. 3, p. 490–500, 2015.

GUROBI OPTIMIZATION. **Gurobi 8.0**, 2018. Disponível em: <<https://www.gurobi.com/downloads/gurobi-optimizer-eula/>>

GUSTAFSON, E. J.; CROW, T. R. Modeling the effects of forest harvesting on landscape structure and the spatial distribution of cowbird brood parasitism. **Landscape Ecology**, v. 9, n. 4, p. 237–248, 1994.

HEINONEN, T. et al. Aggregating micro segments into harvest blocks by using spatial optimization and proximity objectives. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, n. 10, p. 1184–1193, 2018.

JASKIU, E. **PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL ATENDENDO EXIGÊNCIAS DE ÁREAS MÁXIMAS E MÍNIMAS CONTÍNUAS DE COLHEITA**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2015.

JOHN, R. ST.; TÓTH, S. F. Spatially explicit forest harvest scheduling with difference equations. **Annals of Operations Research**, p. 235–257, 2015.

KADIOĞULLARI, A. İ. et al. Controlling Spatial Forest Structure with Spatial Simulation in Forest Management Planning : A Case Study from Turkey. **Sains Malaysiana**, v. 44, n. 3, p. 325–336, 2015.

KAŠPAR, J. et al. Spatial considerations of an area restriction model for identifying harvest blocks at commercial forest plantations. **Lesnícky Časopis - Forestry Journal**, v. 62, p. 146–151, 2016.

KAŠPAR, J.; MARUŠÁK, R.; HLAVATÝ, R. A forest planning approach with respect to the creation of overmature reserved areas in managed forests. **Forests**, v. 6, n. 2, p. 328–343, 2015.

MACHADO, C. C.; LOPES, E. DA S. Eucalipto na produtividade e custo da colheita e analysis of the effect of eucalypt log length on the productivity and cost of wood harvesting and transport. **CERNE**, v. 6, n. 2, p. 124–129, 2000.

MARSHALEK, E. C.; RAMAGE, B. S.; POTTS, M. D. Integrating harvest scheduling and reserve design to improve biodiversity conservation. **Ecological Modelling**, v. 287, p. 27–35, 2014.

MARTINS, I.; CONSTANTINO, M.; BORGES, G. A column generation approach for solving a non-temporal forest harvest model with spatial structure constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 161, p. 478–498, 2005.

MCDILL, M. E.; GEORGE, S. Testing the Use of Lazy Constraints in Solving Area-Based Adjacency Formulations of Harvest Scheduling Models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157–176, 2013.

MCDILL, M. E.; REBAIN, S. A.; BRAZE, J. Harvest Scheduling with Area-Based Adjacency Constraints. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 631–642, 2002.

MITCHELL, A. **Operational Forest Harvest Scheduling Optimisation**. [s.l.] University of Auckland, 2004.

MOREIRA, J. M. M. Á. P.; OLIVEIRA, E. B. DE. Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. In: **Embrapa Florestas**. [s.l.: s.n.]. p. 11–20.

MURRAY, A. T. Harvest Scheduling THE UNITED AND there are increasing. **Forest Science**, v. 45, n. 1, p. 45–52, 1999.

MURRAY, A. T.; WEINTRAUB, A. Scale and Unit Specification Maximum Area Restrictions. **Forest Science**, v. 48, n. 4, p. 779–789, 2002.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. **Silva Fennica**, v. 44, n. 1, p. 77–89, 2010.

ÖHMAN, K.; LÄMÄS, T. Reducing forest fragmentation in long-term forest planning by using the shape index. **Forest Ecology and Management**, v. 212, n. 1–3, p. 346–357, 2005.

ÖHMAN, K.; WIKSTRÖM, P. Incorporating aspects of habitat fragmentation into long-term forest planning using mixed integer programming. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3–4, p. 440–446, 2008.

OLIVEIRA, E. B. DE. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. New York: [s.n.].

PUKKALA, T.; NUUTINEN, T.; KANGAS, J. Integrating scenic and recreational amenities into numerical forest planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 32, n. 3, p. 185–195, 1995.

REMPEL, R. S.; KAUFMANN, C. K. Spatial Modeling of Harvest Constraints on Wood Supply Versus Wildlife Habitat Objectives. **Environmental Management**, v. 32, n. 5, p. 646–659, 2003.

RÖNNQVIST, M. et al. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operations Research**, v. 232, n. 1, p. 11–40, 2015.

SCHENEKEMBERG, C. M. et al. Computers and Operations Research The two-echelon inventory-routing problem with fleet management. **Computers and Operations Research**, v. 121, p. 1–18, 2020.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Informações Florestais**. Disponível em: <<http://snif.florestal.gov.br/pt-br/organizacoes-e-entidades/94-producao-economia-e-mercado-florestal>>. Acesso em: 24 dez. 2019.

SFEIR, T. D. A. et al. Procurement Planning of Forestry Industry Supply Chain – A Canadian Application. **Information Systems Logistics and Supply Chain**, p. 1–8, 2016.

SILVA, P. H. B. M. DA. **PLANEJAMENTO OTIMIZADO DA COLHEITA FLORESTAL POR BLOCOS E TALHÕES INTEGRADO À REDE DE ESTRADAS**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2015.

STANG, M. B. **PLANEJAMENTO FLORESTAL ESPACIAL PARA O AGENDAMENTO OTIMIZADO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2016.

STANG, M. B. et al. Spatial Forest Planning for Optimized Harvest Scheduling. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, p. 1–9, 2019.

TÓTH, S. F.; MCDILL, M. E.; GEORGE, S. Testing the Use of Lazy Constraints in Solving Area-Based Adjacency Formulations of Harvest Scheduling Models. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 157–176, 2013.

YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P. A New Optimization Model for Spatially Constrained Harvest Scheduling under Area Restrictions through Maximum Flow Problem. **Forest Science**, v. 64, n. 22252002, p. 392–406, 2018.

**APÊNDICE 1 – TABELA COM CENÁRIOS PEQUENOS E RESULTADOS DOS
MODELOS**

(continua)

Cenário	Nome	Modelo	FO (R\$)	Tempo (s)
1	30t3a10.70V1	Original	R\$ 22.967.708,60	252,22
2	30t3a10.70V3	Original	R\$ 22.467.806,80	172,41
3	30t3a10.70V4	Original	R\$ 21.840.792,40	41,83
4	30t3a10.70V5	Original	R\$ 22.352.832,80	32,25
5	40t3a10.70V1	Original	R\$ 30.628.279,40	1332,24
6	40t3a10.70V2	Original	R\$ 27.738.945,80	146,31
7	40t3a10.70V3	Original	R\$ 30.946.522,40	445,09
8	40t3a10.70V4	Original	R\$ 30.053.243,20	408,42
9	40t3a10.70V5	Original	R\$ 31.532.520,40	589,58
1	30t3a10.70V1	DV1	R\$ 22.967.708,60	250,97
2	30t3a10.70V3	DV1	R\$ 22.467.806,80	172,52
3	30t3a10.70V4	DV1	R\$ 21.840.792,40	41,82
4	30t3a10.70V5	DV1	R\$ 22.352.832,80	27,80
5	40t3a10.70V1	DV1	R\$ 30.628.279,40	1351,83
6	40t3a10.70V2	DV1	R\$ 27.738.945,80	152,63
7	40t3a10.70V3	DV1	R\$ 30.946.522,40	400,52
8	40t3a10.70V4	DV1	R\$ 30.053.243,20	396,55
9	40t3a10.70V5	DV1	R\$ 31.532.520,40	574,82
1	30t3a10.70V1	DV2	R\$ 22.967.708,60	282,28
2	30t3a10.70V3	DV2	R\$ 22.467.806,80	189,30
3	30t3a10.70V4	DV2	R\$ 21.840.792,40	34,26
4	30t3a10.70V5	DV2	R\$ 22.352.832,80	25,19
5	40t3a10.70V1	DV2	R\$ 30.628.279,40	1461,94
6	40t3a10.70V2	DV2	R\$ 27.738.945,80	164,42
7	40t3a10.70V3	DV2	R\$ 30.946.522,40	828,92
8	40t3a10.70V4	DV2	R\$ 30.053.243,20	380,80
9	40t3a10.70V5	DV2	R\$ 31.532.520,40	665,65
1	30t3a10.70V1	DV3	R\$ 22.967.708,60	488,72
2	30t3a10.70V3	DV3	R\$ 22.467.806,80	189,58
3	30t3a10.70V4	DV3	R\$ 21.840.792,40	35,78
4	30t3a10.70V5	DV3	R\$ 22.352.832,80	33,75
5	40t3a10.70V1	DV3	R\$ 30.628.279,40	937,04
6	40t3a10.70V2	DV3	R\$ 27.738.945,80	425,95
7	40t3a10.70V3	DV3	R\$ 30.946.522,40	426,07
8	40t3a10.70V4	DV3	R\$ 30.053.243,20	338,37
9	40t3a10.70V5	DV3	R\$ 31.532.520,40	957,56
1	30t3a10.70V1	DV4	R\$ 22.967.708,60	500,72
2	30t3a10.70V3	DV4	R\$ 22.467.806,80	331,28
3	30t3a10.70V4	DV4	R\$ 21.840.792,40	41,12
4	30t3a10.70V5	DV4	R\$ 22.352.832,80	34,11
5	40t3a10.70V1	DV4	R\$ 30.628.279,40	1120,31

(continuação)

Cenário	Nome	Modelo	FO (R\$)	Tempo (s)
6	40t3a10.70V2	DV4	R\$ 27.738.945,80	154,17
7	40t3a10.70V3	DV4	R\$ 30.946.522,40	428,34
8	40t3a10.70V4	DV4	R\$ 30.053.243,20	581,88
9	40t3a10.70V5	DV4	R\$ 31.532.520,40	691,72
1	30t3a10.70V1	DV12	R\$ 22.967.708,60	328,50
2	30t3a10.70V3	DV12	R\$ 22.467.806,80	222,99
3	30t3a10.70V4	DV12	R\$ 21.840.792,40	50,04
4	30t3a10.70V5	DV12	R\$ 22.352.832,80	31,57
5	40t3a10.70V1	DV12	R\$ 30.628.279,40	1397,17
6	40t3a10.70V2	DV12	R\$ 27.738.945,80	165,41
7	40t3a10.70V3	DV12	R\$ 30.946.522,40	457,26
8	40t3a10.70V4	DV12	R\$ 30.053.243,20	399,34
9	40t3a10.70V5	DV12	R\$ 31.532.520,40	564,80
1	30t3a10.70V1	DV13	R\$ 22.967.708,60	717,89
2	30t3a10.70V3	DV13	R\$ 22.467.806,80	249,11
3	30t3a10.70V4	DV13	R\$ 21.840.792,40	45,92
4	30t3a10.70V5	DV13	R\$ 22.352.832,80	40,80
5	40t3a10.70V1	DV13	R\$ 30.628.279,40	852,66
6	40t3a10.70V2	DV13	R\$ 27.738.945,80	396,51
7	40t3a10.70V3	DV13	R\$ 30.946.522,40	385,99
8	40t3a10.70V4	DV13	R\$ 30.053.243,20	299,99
9	40t3a10.70V5	DV13	R\$ 31.532.520,40	886,71
1	30t3a10.70V1	DV14	R\$ 22.967.708,60	437,43
2	30t3a10.70V3	DV14	R\$ 22.467.806,80	653,90
3	30t3a10.70V4	DV14	R\$ 21.840.792,40	60,57
4	30t3a10.70V5	DV14	R\$ 22.352.832,80	39,27
5	40t3a10.70V1	DV14	R\$ 30.628.279,40	1172,97
6	40t3a10.70V2	DV14	R\$ 27.738.945,80	145,64
7	40t3a10.70V3	DV14	R\$ 30.946.522,40	264,03
8	40t3a10.70V4	DV14	R\$ 30.053.243,20	326,15
9	40t3a10.70V5	DV14	R\$ 31.532.520,40	587,42
1	30t3a10.70V1	DV24	R\$ 22.967.708,60	443,69
2	30t3a10.70V3	DV24	R\$ 22.467.806,80	173,32
3	30t3a10.70V4	DV24	R\$ 21.840.792,40	43,92
4	30t3a10.70V5	DV24	R\$ 22.352.832,80	55,14
5	40t3a10.70V1	DV24	R\$ 30.628.279,40	1166,27
6	40t3a10.70V2	DV24	R\$ 27.738.945,80	152,00
7	40t3a10.70V3	DV24	R\$ 30.946.522,40	632,20
8	40t3a10.70V4	DV24	R\$ 30.053.243,20	575,38
9	40t3a10.70V5	DV24	R\$ 31.532.520,40	543,70
1	30t3a10.70V1	DV34	R\$ 22.967.708,60	323,05
2	30t3a10.70V3	DV34	R\$ 22.467.806,80	199,85
3	30t3a10.70V4	DV34	R\$ 21.840.792,40	36,23

(conclusão)

Cenário	Nome	Modelo	FO (R\$)	Tempo (s)
4	30t3a10.70V5	DV34	R\$ 22.352.832,80	30,53
5	40t3a10.70V1	DV34	R\$ 30.628.279,40	1231,22
6	40t3a10.70V2	DV34	R\$ 27.738.945,80	133,72
7	40t3a10.70V3	DV34	R\$ 30.946.522,40	568,50
8	40t3a10.70V4	DV34	R\$ 30.053.243,20	311,23
9	40t3a10.70V5	DV34	R\$ 31.532.520,40	781,32
1	30t3a10.70V1	DV124	R\$ 22.967.708,60	391,23
2	30t3a10.70V3	DV124	R\$ 22.467.806,80	300,26
3	30t3a10.70V4	DV124	R\$ 21.840.792,40	45,83
4	30t3a10.70V5	DV124	R\$ 22.352.832,80	37,70
5	40t3a10.70V1	DV124	R\$ 30.628.279,40	1244,36
6	40t3a10.70V2	DV124	R\$ 27.738.945,80	139,85
7	40t3a10.70V3	DV124	R\$ 30.946.522,40	351,82
8	40t3a10.70V4	DV124	R\$ 30.053.243,20	274,95
9	40t3a10.70V5	DV124	R\$ 31.532.520,40	509,96
1	30t3a10.70V1	DV134	R\$ 22.967.708,60	668,71
2	30t3a10.70V3	DV134	R\$ 22.467.806,80	451,91
3	30t3a10.70V4	DV134	R\$ 21.840.792,40	47,07
4	30t3a10.70V5	DV134	R\$ 22.352.832,80	46,49
5	40t3a10.70V1	DV134	R\$ 30.628.279,40	8384,36
6	40t3a10.70V2	DV134	R\$ 27.738.945,80	143,78
7	40t3a10.70V3	DV134	R\$ 30.946.522,40	675,55
8	40t3a10.70V4	DV134	R\$ 30.053.243,20	291,44
9	40t3a10.70V5	DV134	R\$ 31.532.520,40	732,49

FONTE: A autora (2020).

**APÊNDICE 2 – TABELA COM QUANTIDADE DE TEMPOS INFERIORES DE
CADA DV COM A MÉDIA PERCENTUAL DE TEMPO DOS CENÁRIOS
PEQUENOS**

	Quantidade de tempos inferiores ao modelo Original	Média percentual da redução de tempo (%)
DV1	6	2,7
DV2	3	-10,7
DV3	4	-32,9
DV4	3	-26,7
DV12	3	-10,1
DV13	3	-45,7
DV14	5	-38,4
DV24	2	-24,3
DV34	5	-5,1
DV124	5	-8,6
DV134	2	-106,5

FONTE: A autora (2020).

APÊNDICE 3 – TABELA COM RESULTADOS DOS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO

Nome	N	H	AM	F	Original		
					VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,40
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	996,43	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	3612,59	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1734,54	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	5187,32	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	2703,88	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.793.082,60		1,46
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.982.941,40		2,29
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 23.949.716,20		4,15
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.199.754,60		1,94
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.869.347,20		1,42
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.301.002,60		3,53
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.531.174,80		0,54
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.870.950,40		0,44
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.258.048,60		1,29
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.719.773,00		1,24
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.581.262,81		2,24
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.626.035,60		0,80
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.074.593,80		1,06
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 58.976.427,60		0,71
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.868.480,33		3,14
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.367.164,60		2,19
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.961.210,53		2,57
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.793.538,40		1,39
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 69.078.805,07		7,37
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.576.091,20		0,70
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.395.086,40		11,10
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.857.662,00		0,40
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 67.348.211,80		15,70
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.206.517,60		1,76

FONTE: A autora (2020).

DV1							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,40
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	710,99	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	2644,42	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1253,96	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	3729,07	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	1868,29	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.523.210,80		2,15
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.646.432,20		3,31
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.343.827,60		2,46
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.199.754,60		1,93
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.869.347,20		1,42
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.335.679,20		3,40
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.531.174,80		0,54
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.870.950,40		0,44
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.258.048,60		1,28
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.785.594,00		0,88
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.591.300,40		2,20
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.692.302,80		0,57
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.074.593,80		1,06
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 59.077.543,80		0,54
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.868.480,33		3,14
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.437.720,80		1,92
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.961.210,00		2,57
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.793.538,40		1,39
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 68.367.074,69		8,49
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.576.091,20		0,70
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 45.055.196,00		9,16
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.857.662,00		0,40
100t5a10.70V1	100	5	70	At	-		-
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.302.792,20		1,63

FONTE: A autora (2020).

DV2							
Nome	N	H	AM	DI	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60	1056,10 3822,15 1587,52 3089,33 2396,10	0,26
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00		
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80		
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60		
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20		
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00		
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.511.296,60		2,18
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.840.756,60		2,72
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.213.422,20		3,02
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.205.241,60		1,89
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.414.547,40		2,62
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.154.166,20		4,09
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.549.189,60		0,48
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.846.703,20		0,53
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.201.271,20		1,59
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.772.756,20		0,95
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.974.778,40		0,94
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.726.540,00		0,46
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 60.889.144,40		1,37
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 59.079.415,40		0,53
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 38.014.512,31		3,26
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.401.279,80		2,01
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.055.222,20		4,12
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 57.747.797,00		3,23
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	-	-	
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.447.069,40		0,88
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.648.784,01		10,4
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.501.570,20		1,17
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 67.696.067,60		15,1
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.728.546,40		1,03

FONTE: A autora (2020).

DV3							
Nome	N	H	AM	DI	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,31
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	1236,55	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	3530,22	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1496,39	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	4266,85	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	3407,06	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.787.346,00		1,47
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.657.045,20		3,28
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.153.095,60		3,28
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.201.525,20		1,92
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.404.880,80		2,64
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.249.870,00		3,73
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.576.684,40		0,39
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.846.533,40		0,53
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.010.553,60		2,77
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.763.976,40		0,99
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.604.942,80		2,16
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.784.774,40		0,26
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 60.990.153,60		1,20
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 58.842.435,00		0,94
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.495.944,09		4,35
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.420.392,20		1,98
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.773.148,40		2,89
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.609.412,40		1,71
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	-		-
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.528.132,20		0,77
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 45.020.544,51		9,44
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.820.174,40		0,48
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 68.690.903,40		13,40
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.366.158,00		1,54

FONTE: A autora (2020).

DV4							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60	1111,62 3130,19 2584,57 5695,39 3520,94	0,36
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00		
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80		
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60		
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20		
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00		
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 40.089.421,00		0,71
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.836.675,80		2,73
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 23.997.363,20		3,95
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.201.525,20		1,89
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.938.376,20		1,24
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.156.529,20		4,08
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.521.925,60		0,58
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.849.707,60		0,52
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.149.655,40		2,03
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.627.482,20		1,74
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.678.383,20		1,91
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.780.924,80		0,28
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.075.498,40		1,06
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 59.012.184,20		0,65
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.915.728,95		3,45
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.551.077,80		1,64
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.476.534,32		3,4
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.801.473,20		1,38
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 68.766.716,00		7,86
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.486.166,20		0,83
100t5a10.70N1	100	5	70	F	-		-
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.302.719,40		1,6
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 70.558.548,00		10,4
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.221.548,80		1,74

FONTE: A autora (2020).

DV12							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,26
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	1114,31	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	3619,18	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1499,81	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	2960,65	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	2254,03	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.868.649,20		1,27
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.690.902,60		3,18
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.213.422,20		3,01
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.205.241,60		1,88
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.414.547,40		2,62
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.154.166,20		4,09
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.549.189,60		0,48
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.846.703,20		0,53
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.216.443,20		1,51
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.772.756,20		0,95
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.687.143,60		1,88
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.726.540,00		0,46
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 60.889.144,40		1,37
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 59.079.415,40		0,54
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 38.014.512,31		3,1
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.401.279,80		2
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.055.222,20		4,12
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 57.747.797,00		3,23
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	-	-	-
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.447.069,40		0,88
100t5a10.70N1	100	5	70	F	-	-	-
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.501.570,20		1,17
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 69.445.686,80		12,2
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.728.546,40		1,03

FONTE: A autora (2020).

DV13							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	AI	R\$ 40.853.004,60	942,54 2754,28 1150,70 3206,96 2535,90	0,24
50t3a10.70A2	50	3	70	AI	R\$ 32.673.065,00		
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80		
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60		
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20		
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00		
50t5a10.70A1	50	5	70	AI	R\$ 39.787.346,00		1,47
50t5a10.70A2	50	5	70	AI	R\$ 33.619.555,20		3,40
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.153.095,60		3,28
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.226.371,40		1,74
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.404.880,80		2,64
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.249.870,00		3,73
80t5a10.30A1	80	5	30	AI	R\$ 28.576.684,40		0,39
80t5a10.30A2	80	5	30	AI	R\$ 27.846.533,40		0,53
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.046.860,80		2,43
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.763.976,40		0,99
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.604.942,80		2,16
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.747.709,20		0,39
80t5a10.70A1	80	5	70	AI	R\$ 60.990.153,60		1,20
80t5a10.70A2	80	5	70	AI	R\$ 59.069.852,42		0,55
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.495.941,60		4,30
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.439.196,60		1,90
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.773.148,40		2,89
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.609.412,40		1,71
100t5a10.70A1	100	5	70	AI	R\$ 69.422.135,80		6,84
100t5a10.70A2	100	5	70	AI	R\$ 73.528.132,20		0,77
100t5a10.70N1	100	5	70	F	-		-
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.820.174,40		0,48
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 69.490.037,20		12,10
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.386.981,60		1,51

FONTE: A autora (2020).

DV14							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	AI	R\$ 40.853.004,60		0,30
50t3a10.70A2	50	3	70	AI	R\$ 32.673.065,00	794,54	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	3051,68	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1729,55	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	2426,18	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	4958,95	
50t5a10.70A1	50	5	70	AI	R\$ 39.939.916,60		1,09
50t5a10.70A2	50	5	70	AI	R\$ 33.782.184,20		2,90
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.426.164,80		2,12
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.201.525,20		1,91
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.672.896,00		1,93
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.247.169,60		3,74
80t5a10.30A1	80	5	30	AI	R\$ 28.538.727,40		0,52
80t5a10.30A2	80	5	30	AI	R\$ 27.807.560,20		0,67
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.155.269,60		1,84
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.733.969,00		1,16
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.634.798,60		2,06
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.723.309,40		0,47
80t5a10.70A1	80	5	70	AI	R\$ 60.951.101,20		1,26
80t5a10.70A2	80	5	70	AI	R\$ 58.846.325,60		0,93
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.675.397,84		4,02
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.566.848,00		1,54
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.902.778,19		2,67
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 59.079.099,00		0,90
100t5a10.70A1	100	5	70	AI	-	-	-
100t5a10.70A2	100	5	70	AI	R\$ 73.246.109,00		1,16
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.023.289,60		11,90
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.795.956,02		0,53
100t5a10.70V1	100	5	70	At	-	-	-
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.315.415,40		1,61

FONTE: A autora (2020).

DV24							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,43
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	761,65	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	2734,98	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1135,95	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	1712,67	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	1418,99	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 40.209.959,00		0,41
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.825.562,60		2,76
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 23.991.208,80		3,97
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.215.218,20		1,76
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 39.014.635,80		1,04
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.451.857,40		2,96
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.505.016,20		0,64
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.887.138,40		0,38
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.092.954,20		2,19
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.752.991,20		1,04
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.721.252,20		1,77
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.603.389,40		0,88
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.069.767,80		1,07
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 58.865.193,80		0,90
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.872.820,66		3,33
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.651.837,80		1,20
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.944.432,35		2,60
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 59.291.880,00		0,54
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	-		-
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.411.640,00		0,93
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.971.100,67		9,24
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.800.643,60		0,52
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 68.998.064,00		12,90
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.728.939,40		1,03

FONTE: A autora (2020).

DV34							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo (s)	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60	1539,61 2288,46 2589,38 4681,31 3203,36	0,67
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00		
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80		
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60		
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20		
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00		
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.849.872,20		1,31
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.582.776,60		3,51
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.183.714,60		3,14
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.215.218,20		1,79
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.608.201,80		2,10
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.464.105,80		2,92
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.545.488,60		0,49
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.804.244,00		0,68
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.126.300,40		1,99
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.748.759,80		1,08
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.660.373,66		1,97
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.789.475,00		0,25
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 60.787.274,20		1,54
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 58.769.593,60		1,07
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 37.841.379,46		3,79
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.532.421,00		1,64
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.860.794,36		2,74
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.855.849,40		1,29
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 68.212.570,00		8,74
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.403.852,60		0,94
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 43.554.946,80		13,00
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 45.974.609,40		2,33
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 71.328.360,60		9,25
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.638.025,00		1,16

FONTE: A autora (2020).

DV124							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,47
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	1097,30	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	2623,88	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	1304,47	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	5070,97	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	2595,47	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.696.936,20		1,71
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.789.725,60		2,87
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.046.720,00		3,74
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.226.371,40		1,69
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.837.156,00		1,50
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 26.910.711,00		5,03
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.518.179,60		0,59
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.871.283,00		0,44
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.171.088,40		1,75
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.606.952,60		1,85
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.822.450,40		1,44
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.781.537,80		0,27
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.128.445,60		0,97
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 58.837.627,20		0,95
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 38.020.314,60		2,84
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.465.667,40		1,85
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.173.749,73		3,92
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.601.787,20		1,73
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 68.099.275,60		8,92
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.576.507,20		0,70
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 44.377.935,60		11,00
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.838.221,40		0,44
100t5a10.70V1	100	5	70	At	R\$ 71.227.321,76		9,40
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 71.868.800,20		2,24

FONTE: A autora (2020).

DV134							
Nome	N	H	AM	F	VPL (R\$)	Tempo	GAP (%)
50t3a10.70A1	50	3	70	Al	R\$ 40.853.004,60		0,20
50t3a10.70A2	50	3	70	Al	R\$ 32.673.065,00	694,41	
50t3a10.70N1	50	3	70	F	R\$ 25.481.502,80	2656,53	
50t3a10.70N2	50	3	70	F	R\$ 16.677.112,60	3634,14	
50t3a10.70V1	50	3	70	At	R\$ 40.799.446,20	5258,92	
50t3a10.70V2	50	3	70	At	R\$ 28.006.417,00	2495,84	
50t5a10.70A1	50	5	70	Al	R\$ 39.503.577,40		2,20
50t5a10.70A2	50	5	70	Al	R\$ 33.726.165,60		3,07
50t5a10.70N1	50	5	70	F	R\$ 24.081.684,60		3,59
50t5a10.70N2	50	5	70	F	R\$ 15.194.877,60		1,97
50t5a10.70V1	50	5	70	At	R\$ 38.433.863,60		2,57
50t5a10.70V2	50	5	70	At	R\$ 27.451.857,40		2,96
80t5a10.30A1	80	5	30	Al	R\$ 28.540.300,80		0,51
80t5a10.30A2	80	5	30	Al	R\$ 27.909.738,00		0,30
80t5a10.30N1	80	5	30	F	R\$ 19.121.348,67		2,19
80t5a10.30N2	80	5	30	F	R\$ 18.834.552,00		0,62
80t5a10.30V1	80	5	30	At	R\$ 30.977.230,68		0,93
80t5a10.30V2	80	5	30	At	R\$ 29.661.057,60		0,68
80t5a10.70A1	80	5	70	Al	R\$ 61.044.140,00		1,11
80t5a10.70A2	80	5	70	Al	R\$ 59.132.076,00		0,45
80t5a10.70N1	80	5	70	F	R\$ 38.006.198,11		2,80
80t5a10.70N2	80	5	70	F	R\$ 37.678.585,00		1,27
80t5a10.70V1	80	5	70	At	R\$ 60.383.139,20		3,56
80t5a10.70V2	80	5	70	At	R\$ 58.830.787,60		1,33
100t5a10.70A1	100	5	70	Al	R\$ 67.564.484,40		9,78
100t5a10.70A2	100	5	70	Al	R\$ 73.236.443,40		1,17
100t5a10.70N1	100	5	70	F	R\$ 43.554.946,92		12,80
100t5a10.70N2	100	5	70	F	R\$ 46.541.988,20		1,08
100t5a10.70V1	100	5	70	At	-		-
100t5a10.70V2	100	5	70	At	R\$ 72.649.994,00		1,14

FONTE: A autora (2020).

APÊNDICE 4 – TABELA COM QUANTIDADES EM QUE CADA COMBINAÇÃO DE DV É MELHOR QUE O MODELO ORIGINAL E A MÉDIA PERCENTUAL DE REDUÇÃO DOS CENÁRIOS COM 2H DE PROCESSAMENTO

	Quantidade de tempos inferiores ao modelo Original	Média percentual da redução de tempo (%)	Quantidade de GAP inferiores ao modelo Original	Média percentual da redução de GAP (%)
DV1	5	28,4	11	2,5
DV2	3	9,7	12	-15,5
DV3	3	-3,3	11	-8,5
DV4	1	-17,4	12	-12,3
DV12	3	12,2	13	-15,1
DV13	5	21,4	12	-4,6
DV14	4	1,2	11	-5,1
DV24	5	39,4	13	5,7
DV34	2	-15,2	12	-27,3
DV124	4	9,7	9	-6,9
DV134	3	-9,3	13	-8,2

FONTE: A autora (2020).

**APÊNDICE 5 – TABELA COM CENÁRIOS E RESULTADOS OBTIDOS COM A
RESTRIÇÃO DE IDADE MÍNIMA PARA CORTE**

(continua)

Cenários	Nomes	Modelo	VPL (R\$)	GAP (%)
40	80t5a10.30V1	Original	R\$ 20.729.456,80	0,41
41	80t5a10.30V2	Original	R\$ 19.636.352,00	0,67
42	80t5a10.70V1	Original	R\$ 41.604.399,80	0,28
43	80t5a10.70V2	Original	R\$ 38.832.187,00	1,56
44	100t5a10.70V1	Original	R\$ 50.986.410,32	1,93
40	80t5a10.30V1	DV1	R\$ 20.729.456,80	0,41
41	80t5a10.30V2	DV1	R\$ 19.549.444,60	1,15
42	80t5a10.70V1	DV1	R\$ 41.604.399,80	0,28
43	80t5a10.70V2	DV1	R\$ 38.752.648,40	1,80
44	100t5a10.70V1	DV1	R\$ 51.128.561,24	1,65
40	80t5a10.30V1	DV2	R\$ 20.754.600,20	0,29
41	80t5a10.30V2	DV2	R\$ 19.632.462,40	0,70
42	80t5a10.70V1	DV2	R\$ 41.571.316,00	0,36
43	80t5a10.70V2	DV2	R\$ 38.702.313,60	2,20
44	100t5a10.70V1	DV2	R\$ 51.350.950,06	1,21
40	80t5a10.30V1	DV3	R\$ 20.708.943,00	0,51
41	80t5a10.30V2	DV3	R\$ 19.633.461,20	0,68
42	80t5a10.70V1	DV3	R\$ 41.597.184,80	0,30
43	80t5a10.70V2	DV3	R\$ 38.729.667,20	2,17
44	100t5a10.70V1	DV3	R\$ 51.125.416,02	1,66
40	80t5a10.30V1	DV4	R\$ 20.755.233,40	0,29
41	80t5a10.30V2	DV4	R\$ 19.609.789,20	0,80
42	80t5a10.70V1	DV4	R\$ 41.601.425,20	0,29
43	80t5a10.70V2	DV4	R\$ 38.584.369,20	2,50
44	100t5a10.70V1	DV4	R\$ 51.218.154,93	1,47
40	80t5a10.30V1	DV12	R\$ 20.745.793,60	0,33
41	80t5a10.30V2	DV12	R\$ 19.632.462,40	0,70
42	80t5a10.70V1	DV12	R\$ 41.606.068,00	0,28
43	80t5a10.70V2	DV12	R\$ 38.702.313,60	2,20
44	100t5a10.70V1	DV12	R\$ 51.350.950,06	1,21
40	80t5a10.30V1	DV13	R\$ 20.708.943,00	0,51
41	80t5a10.30V2	DV13	R\$ 19.633.461,20	0,68
42	80t5a10.70V1	DV13	R\$ 41.572.325,00	0,36
43	80t5a10.70V2	DV13	R\$ 38.729.667,20	2,17
44	100t5a10.70V1	DV13	R\$ 51.345.366,17	1,22
40	80t5a10.30V1	DV14	R\$ 20.731.391,40	0,40
41	80t5a10.30V2	DV14	R\$ 19.611.263,60	0,81
42	80t5a10.70V1	DV14	R\$ 41.616.722,20	0,25
43	80t5a10.70V2	DV14	R\$ 39.213.583,60	0,54
44	100t5a10.70V1	DV14	R\$ 51.329.279,43	1,25

(conclusão)

Cenários	Nomes	Modelo	VPL (R\$)	GAP (%)
40	80t5a10.30V1	DV24	R\$ 20.754.459,00	0,29
41	80t5a10.30V2	DV24	R\$ 19.566.025,60	1,01
42	80t5a10.70V1	DV24	R\$ 41.567.712,80	0,37
43	80t5a10.70V2	DV24	R\$ 38.729.073,20	1,74
44	100t5a10.70V1	DV24	R\$ 51.218.155,35	1,47
40	80t5a10.30V1	DV34	R\$ 20.752.877,40	0,30
41	80t5a10.30V2	DV34	R\$ 19.577.005,60	1,01
42	80t5a10.70V1	DV34	R\$ 41.613.688,00	0,26
43	80t5a10.70V2	DV34	R\$ 38.907.473,20	1,32
44	100t5a10.70V1	DV34	R\$ 51.341.533,28	1,23
40	80t5a10.30V1	DV124	R\$ 20.738.681,20	0,37
41	80t5a10.30V2	DV124	R\$ 19.568.728,20	1,01
42	80t5a10.70V1	DV124	R\$ 41.539.259,20	0,44
43	80t5a10.70V2	DV124	R\$ 39.094.929,20	0,80
44	100t5a10.70V1	DV124	R\$ 51.248.428,82	1,41
40	80t5a10.30V1	DV134	R\$ 20.725.938,80	0,43
41	80t5a10.30V2	DV134	R\$ 19.618.432,80	0,70
42	80t5a10.70V1	DV134	R\$ 41.544.946,40	0,43
43	80t5a10.70V2	DV134	R\$ 38.962.913,00	1,11
44	100t5a10.70V1	DV134	R\$ 51.350.950,00	1,21

FONTE: A autora (2020).

**APÊNDICE 6 – TABELA DE QUANTIDADE DE GAP INFERIORES DE CADA DV
COM A MÉDIA PERCENTUAL DE GAP CONSIDERANDO RESTRIÇÃO DE IDADE
MÍNIMA**

	Quantidade de GAP inferiores ao GAP do modelo Original_Id	Média percentual da redução de GAP (%)
DV1	1	-14,50
DV2	2	-1,50
DV3	1	-11,63
DV4	2	-6,03
DV12	2	2,26
DV13	1	-11,35
DV14	4	18,58
DV24	2	-8,27
DV34	4	6,98
DV124	3	-4,49
DV134	2	0,64

FONTE: A autora (2020).

**APÊNDICE 7 – TABELA COM CENÁRIOS E RESULTADOS DOS MODELOS
COM RESTRIÇÕES DE IMPOSIÇÃO DE TALHÕES PARA O CORTE NO
PRIMEIRO ANO DO HP**

(continua)

Cenário	Nome	Modelo	VPL (R\$)	GAP (%)
45	80t5a10.30V1	Original	R\$ 30.746.041,80	1,68
46	80t5a10.30V2	Original	R\$ 29.785.110,40	0,25
47	80t5a10.70V1	Original	R\$ 59.428.880,00	5,20
48	80t5a10.70V2	Original	R\$ 58.489.797,40	1,91
49	100t5a10.70V1	Original	-	-
50	100t5a10.70V2	Original	R\$ 72.119.405,00	1,88
45	80t5a10.30V1	DV1	R\$ 30.746.041,80	1,68
46	80t5a10.30V2	DV1	R\$ 29.775.526,80	0,29
47	80t5a10.70V1	DV1	R\$ 59.428.880,00	5,20
48	80t5a10.70V2	DV1	R\$ 58.489.797,40	1,91
49	100t5a10.70V1	DV1	-	-
50	100t5a10.70V2	DV1	R\$ 72.119.405,00	1,88
45	80t5a10.30V1	DV2	R\$ 30.255.970,80	3,32
46	80t5a10.30V2	DV2	R\$ 29.701.149,20	0,54
47	80t5a10.70V1	DV2	R\$ 60.487.460,00	3,35
48	80t5a10.70V2	DV2	R\$ 58.553.014,20	1,80
49	100t5a10.70V1	DV2	R\$ 69.767.669,80	4,02
50	100t5a10.70V2	DV2	R\$ 72.742.525,40	1,01
45	80t5a10.30V1	DV3	R\$ 30.278.456,20	3,25
46	80t5a10.30V2	DV3	R\$ 29.630.486,20	0,78
47	80t5a10.70V1	DV3	R\$ 59.759.228,80	4,60
48	80t5a10.70V2	DV3	R\$ 58.613.122,80	1,69
49	100t5a10.70V1	DV3	R\$ 69.591.355,20	4,48
50	100t5a10.70V2	DV3	R\$ 72.582.989,30	1,23
45	80t5a10.30V1	DV4	R\$ 30.428.516,60	2,74
46	80t5a10.30V2	DV4	R\$ 29.724.869,60	0,46
47	80t5a10.70V1	DV4	R\$ 60.407.556,20	3,47
48	80t5a10.70V2	DV4	R\$ 58.694.083,40	1,55
49	100t5a10.70V1	DV4	R\$ 68.966.668,75	5,29
50	100t5a10.70V2	DV4	R\$ 72.994.169,80	0,66
45	80t5a10.30V1	DV12	R\$ 30.255.970,80	3,32
46	80t5a10.30V2	DV12	R\$ 29.761.496,60	0,34
47	80t5a10.70V1	DV12	R\$ 60.487.460,00	3,35
48	80t5a10.70V2	DV12	R\$ 58.553.014,20	1,80
49	100t5a10.70V1	DV12	R\$ 69.704.995,14	4,12
50	100t5a10.70V2	DV12	R\$ 72.742.525,40	1,01
45	80t5a10.30V1	DV13	R\$ 30.490.325,00	2,53
46	80t5a10.30V2	DV13	R\$ 29.630.486,20	0,78

(conclusão)

Cenário	Nome	Modelo	VPL (R\$)	GAP (%)
47	80t5a10.70V1	DV13	R\$ 60.504.351,80	3,20
48	80t5a10.70V2	DV13	R\$ 58.613.122,80	1,69
49	100t5a10.70V1	DV13	R\$ 69.591.355,20	4,48
50	100t5a10.70V2	DV13	R\$ 72.118.228,60	1,88
45	80t5a10.30V1	DV14	R\$ 30.721.652,40	1,76
46	80t5a10.30V2	DV14	R\$ 29.778.368,60	0,28
47	80t5a10.70V1	DV14	R\$ 60.147.136,80	3,94
48	80t5a10.70V2	DV14	R\$ 58.464.099,40	1,96
49	100t5a10.70V1	DV14	R\$ 68.680.808,40	5,65
50	100t5a10.70V2	DV14	R\$ 72.818.313,40	0,90
45	80t5a10.30V1	DV24	R\$ 30.746.041,80	1,68
46	80t5a10.30V2	DV24	R\$ 29.762.147,20	0,33
47	80t5a10.70V1	DV24	R\$ 60.610.753,40	3,00
48	80t5a10.70V2	DV24	R\$ 58.783.285,20	1,40
49	100t5a10.70V1	DV24	R\$ 68.405.926,60	6,06
50	100t5a10.70V2	DV24	R\$ 73.038.791,40	0,60
45	80t5a10.30V1	DV34	R\$ 30.711.614,40	1,79
46	80t5a10.30V2	DV34	R\$ 29.716.661,60	0,48
47	80t5a10.70V1	DV34	R\$ 59.330.791,80	5,38
48	80t5a10.70V2	DV34	R\$ 59.046.172,20	0,95
49	100t5a10.70V1	DV34	R\$ 68.896.140,00	5,63
50	100t5a10.70V2	DV34	R\$ 72.629.766,80	1,16
45	80t5a10.30V1	DV124	R\$ 30.377.440,40	2,91
46	80t5a10.30V2	DV124	R\$ 29.705.741,20	0,52
47	80t5a10.70V1	DV124	R\$ 60.362.727,20	3,57
48	80t5a10.70V2	DV124	R\$ 58.595.479,00	1,72
49	100t5a10.70V1	DV124	R\$ 68.535.011,48	5,51
50	100t5a10.70V2	DV124	R\$ 73.298.936,40	0,24
45	80t5a10.30V1	DV134	R\$ 30.130.115,80	3,76
46	80t5a10.30V2	DV134	R\$ 29.756.049,60	0,35
47	80t5a10.70V1	DV134	R\$ 60.421.915,00	3,30
48	80t5a10.70V2	DV134	R\$ 58.712.383,40	1,52
49	100t5a10.70V1	DV134	-	-
50	100t5a10.70V2	DV134	R\$ 72.928.225,40	0,75

FONTE: A autora (2020).

NOTA: - significa que em 2h de processamento não se obteve nenhuma conclusão, nem que o modelo é inviável ou viável.

**APÊNDICE 8 – TABELA COM QUANTIDADE DE GAP INFERIORES DE CADA DV
COM A MÉDIA PERCENTUAL DE GAP EM RELAÇÃO AO MODELO
ORIGINAL_R**

	Quantidade de GAP inferiores ao modelo Original_R	Média percentual da redução de GAP (%)
DV1	0	-3,20
DV2	4	-25,20
DV3	4	-49,56
DV4	4	-6,02
DV12	4	-9,20
DV13	3	-42,52
DV14	3	11,40
DV24	4	21,02
DV34	3	-2,69
DV124	4	-10,54
DV134	3	-9,35

FONTE: A autora (2020).